

**Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje**

POSTUPAK UMJERAVANJA PRIJENOSNIH ETALONA SILE

Završni rad

Mia Videc

Zagreb, 2007.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

POSTUPAK UMJERAVANJA PRIJENOSNIH ETALONA SILE

Završni rad

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. Mladen Franz

Mia Videc

Zagreb, 2007.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni projekt izradila samostalno, uz stručnu pomoć
Mr.sc. Željka Alara i Dipl.ing. Tamare Aleksandrov.

Studentica

Mia Videc

SADRŽAJ

Sažetak.....	1
Popis slika.....	2
Popis tablica.....	5
Popis oznaka.....	7
1. Uvod.....	8
2. Mjerenje sile.....	9
2.1. Općenito o sili.....	9
2.2. Mjerenje sile.....	10
2.3. Sljedivost mjerenja sile.....	11
2.3.1. Općenito o sljedivosti.....	11
2.3.2. Shema sljedivosti.....	12
2.3.3. Etaloni sile.....	14
2.3.4. Prijenosni etaloni sile.....	16
3. Umjeravanje prijenosnih etalona sile.....	19
3.1. Općenito o umjeravanju.....	19
3.2. Umjeravanje prijenosnih etalona sile prema normi EN ISO 376.....	21
3.2.1. Karakteristike etalona.....	21
3.2.2. Priprema za umjeravanje.....	22
3.2.3. Rezolucija (r).....	22
3.2.4. Minimalna sila.....	22
3.2.5. Postupak umjeravanja.....	23
3.2.6. Kriteriji ocjenjivanja prijenosnog etalona.....	24
3.2.7. Klasifikacija prijenosnih etalona.....	25

3.2.8. Potvrde o umjeravanju.....	26
4. Eksperimentalni dio.....	27
4.1. Plan eksperimenta.....	27
4.2. Osnovni podaci o referentnom etalonu.....	28
4.3. Umjeravani prijenosni etaloni.....	29
4.4. Rezultati umjeravanja.....	30
4.4.1. Rezultati mjerenja.....	30
4.4.2. Interpolacijske krivulje.....	31
4.4.3. Kriteriji ocjenjivanja.....	36
4.5. Analiza rezultata umjeravanja.....	38
5. Zaključak.....	43
Literatura.....	44
Prilog I: Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4/100 kN.....	45
Prilog II: Rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4/200 kN.....	51

SAŽETAK

U ovom završnom projektu teoretski i eksperimentalno obrađen je postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile.

U teoretskom dijelu dane su neke osnove mjerenja sile te značajke fizikalne veličine sile. Također je dan osvrt na značenje mjerne sljedivosti te načini njenog ostvarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je umjeravanje tri prijenosna etalona nazivnih sila 100 kN, 200 kN i 500 kN. Umjeravanje je provedeno u skladu s normom EN ISO 376 na referentnom etalonu u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Rezultati mjerenja su obrađeni i analizirani. Posebno je dano težište na značaj interpolacije krivulje umjeravanja te njen utjecaj na klasifikaciju u određeni razred točnosti prijenosnih etalona sile. Također su obrađeni i ostali kriteriji za klasifikaciju prijenosnih etalona sile.

POPIS SLIKA

Slika 1. Piramida sljedivosti.....	12
Slika 2. Piramida sljedivosti etalona za silu u Hrvatskoj s pripadnim proširenim mjernim nesigurnostima.....	13
Slika 3. Primarni etalon za silu nazivne sile 1 MN, PTB-u, Njemačka.....	14
Slika 4. Kompletan pribor prijenosnog etalona.....	16
Slika 5. Tipovi elastičnih elemenata s dopuštenim opterećenjima.....	17
Slika 6. Tipovi DMS traka.....	17
Slika 7. Primjer indirektnog mjerenja sile pomoću DMS traka.....	18
Slika 8. Položaj DMS mjernih traka u Wheatstonovom mostu.....	18
Slika 9. Dinamometri prijenosnih etalona LIMS-a.....	18
Slika 10. Shema umjeravanja.....	19
Slika 11. Pozicije mjernih nizova na dinamometru umjeravanog etalona.....	23
Slika 12. Referentni etalon sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava (FSB).....	28
Slika 13. Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona.....	28
Slika 14. Dinamometri tipa Z4, slijeva na desno: Z4/500 kN, Z4/200 kN, Z4/100 kN.....	29
Slika 15. MGC plus pojačalo.....	29
Slika 16. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN pravcem (polinomom 1. stupnja).....	31
Slika 17. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 2. stupnja.....	32
Slika 18. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 3. stupnja.....	32
Slika 19. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 5. stupnja.....	33
Slika 20. Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/500 kN.....	34
Slika 21. Inverzni prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 3. stupnja.....	35
Slika 22. Relativna greška ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4/500 kN.....	36

Slika 23. Relativna greška obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4/500 kN..	37
Slika 24. Relativna greška histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4/500 kN.....	37
Slika 25. Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2.,3. i 5. stupnja za etalon Z4/100 kN.....	39
Slika 26. Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2.,3. i 5. stupnja za etalon Z4/200 kN.....	40
Slika 27. Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2.,3. i 5. stupnja za etalon Z4/500 kN.....	40
Slika 28. Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za linearizaciju (polinom 1. stupnja).....	41
Slika 29. Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za polinom 2. stupnja.....	41
Slika 30. Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za polinom 3. stupnja.....	42
Slika 31. Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za polinom 5. stupnja.....	42
Slika 32. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN pravcem (polinomom 1. stupnja).	45
Slika 33. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 2. stupnja.....	46
Slika 34. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 3. stupnja.....	46
Slika 35. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 5. stupnja.....	47
Slika 36. Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2.,3. i 5. stupnja za etalon Z4/100 kN.....	48
Slika 37. Inverzni prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 3. stupnja.....	49
Slika 38. Relativna greška ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4/100 kN...	50
Slika 39. Relativna greška obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4/100 kN..	50
Slika 40. Relativna greška histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4/100 kN.....	50
Slika 41. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN pravcem (polinomom 1. stupnja).	51
Slika 42. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 2. stupnja.....	52
Slika 43. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 3. stupnja.....	52
Slika 44. Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 5. stupnja.....	53

Slika 45. Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2.,3. i 5. stupnja za etalon Z4/200 kN.....	54
Slika 46. Inverzni prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 3. stupnja.....	55
Slika 47. Relativna greška ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4/200 kN...	56
Slika 48. Relativna greška obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4/200 kN..	56
Slika 49. Relativna greška histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4/200 kN.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Referentni etaloni prema mehanizmima opterećenja i pripadne najbolje mjerne sposobnosti (proširene relativne mjerne nesigurnosti).....	15
Tablica 2. Veličine pri umjeravanju prijenosnih etalona.....	21
Tablica 3. Klase prijenosnih etalona i odgovarajuće vrijednosti kriterija.....	26
Tablica 4. Karakteristike referentnog etalona sile.....	28
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4/500 kN.....	30
Tablica 6. Rezultati umjeravanja etalona Z4/500 kN.....	30
Tablica 7. Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stupnja za prijenosni etalon Z4/500 kN.....	33
Tablica 8. Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4/500 kN.....	35
Tablica 9. Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4/500 kN.....	36
Tablica 10. Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4/500 kN.....	36
Tablica 11. Kriteriji ocjenjivanja i klasifikacija prijenosnih etalona Z4/100 kN, Z4/200 kN i Z4/500 kN.....	38
Tablica 12. Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4/100 kN.....	45
Tablica 13. Rezultati umjeravanja etalona Z4/100kN.....	45
Tablica 14. Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stupnja za prijenosni etalon Z4/100 kN.....	47
Tablica 15. Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4/100 kN.....	48
Tablica 16. Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4/100 kN.....	49
Tablica 17. Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4/100 kN.....	49
Tablica 18. Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4/200 kN.....	51
Tablica 19. Rezultati umjeravanja etalona Z4/200kN.....	51

Tablica 20. Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stupnja za prijenosni etalon Z4/200 kN.....	53
Tablica 21. Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4/200 kN.....	54
Tablica 22. Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4/200 kN.....	55
Tablica 23. Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4/200 kN.....	55

POPIS OZNAKA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	ZNAČENJE
a	m/s^2	Ubrzanje
b	%	Relativna greška ponovljivosti s rotacijom
b'	%	Relativna greška obnovljivosti bez rotacije
f_c	%	Relativno interpolacijsko odstupanje
f_0	%	Relativno odstupanje nul vrijednosti
F	N	Sila
F_f	N	Nazivna sila dinamometra
F_{\min}	N	Minimalna sila primjenjena na dinamometru
F_N	N	Maksimalna sila umjeravanja
g	m/s^2	Lokalno gravitacijsko ubrzanje
i_0	mV/V	Očitanje na indikatoru prije opterećenja
i_f	mV/V	Očitanje na indikatoru nakon rasterećenja
k		Faktor pokrivanja
l	m	Duljina
m	kg	Masa
r	N	Rezolucija indikatora
R	Ω	Električni otpor
U	%	Proširena mjerna nesigurnost
U	V	Napon
X_i	mV/V	Izmjerena vrijednost pri rastućoj sili u i-tom mjernom nizu
X_i'	mV/V	Izmjerena vrijednost pri padajućoj sili u i-tom mjernom nizu
X_a	mV/V	Interpolirana vrijednost otklona
X_{\max}	mV/V	Maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_{\min}	mV/V	Minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_N	mV/V	Otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja
$X_{\text{sf-r}}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
$X_{\text{sf-wt}}$	mV/V	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju
ν	%	Relativna greška histereze
Y	mV/V	Interpolirana vrijednost otklona
ε	mm/mm	Istezanje

1. UVOD

Jedna od najvažnijih fizikalnih veličina je sila. To je vektorska veličina koja se definira kao mjera interakcije među tijelima. Mjerna jedinica za silu je 1 Newton [N].

Sila je iznimno važan pojam u strojarstvu i u drugim granama tehnike i znanosti. Pojavljuje se u različitim oblicima u svim mehanizmima i sustavima te je njeno poznavanje i mjerenje nužno za konstrukciju, izvedbu, primjenu i sigurnost raznih uređaja, kao i za određivanje brojnih svojstava različitih materijala.

Za različite sustave potrebne su različite točnosti mjerenja sile. Da bi se ostvarilo pouzdano i točno mjerenje, treba koristiti pravilne mjerne tehnike i uređaje. Da bi mjerila sile pružala zadovoljavajuću kvalitetu mjerenja, moraju biti umjerena. To znači da moraju biti „uspoređena“ s mjerilom na višoj mjeriteljskoj razini.

U ovom radu bit će objašnjena važnost i načini mjerenja sile te oni elementi mjeriteljstva koji osiguravaju pouzdanost i točnost mjerenja. Najviše će biti riječi o prijenosnim etalonima, principu njihova rada i postupku njihova umjeravanja. U eksperimentalnom dijelu bit će umjerena tri prijenosna etalona tipa Z4 nazivnih sila 100 kN, 200 kN i 500 kN, s namjerom da se obrade svi važni podaci umjeravanja te da se etaloni svrstaju u neku klasu.

2. MJERENJE SILE

2.1. OPĆENITO O SILI

Sila je jedna od temeljnih fizikalnih veličina u brojnim znanstvenim disciplinama te tehnici i tehnologiji. Silu kao fizikalnu veličinu možemo definirati kao mjeru interakcije među tijelima [1]. To je vektorska veličina, što znači da ima određeni iznos, ali i smjer djelovanja. Sila se pojavljuje u različitim oblicima – gravitacijska, elektromagnetska, atomska itd, ali teže ju je zamisliti nego masu ili duljinu, te je za razliku od mase treba stvoriti.

Djelovanje sile na neko tijelo može uzrokovati različite posljedice. Ovisno o porijeklu i obliku sile koja djeluje na promatrano tijelo, to mogu biti:

- promjena građe tijela,
- promjena oblika tijela,
- promjena položaja, tj. gibanje tijela.

U znanosti o materijalima, djelovanje sile na tijelo proučava se prije svega zbog promatranja ponašanja materijala tijela, a pomoću toga određuju se brojna mehanička svojstva pojedinih materijala, koja su prije svega vezana uz promjenu oblika materijala, tj. ispitnog tijela. Sile kojima se djeluje na materijale mogu imati različite iznose te mogu djelovati na različite načine na materijal, s obzirom da je sila vektorska veličina. Prema tome razlikuju se različita opterećenja na materijal – vlak, tlak, smik, savijanje, torzija, zatim statičko i dinamičko opterećenje, kratkotrajno i dugotrajno opterećenje itd.

Silu i njeno djelovanje pobliže definiraju tri osnovna zakona – Newtonova zakona[2]:

I. Newtonov zakon: Svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu, sve dok neka sila koja djeluje na njega to ne promijeni.

II. Newtonov zakon: Ubrzanje je proporcionalno sili što djeluje na tijelo, a zbiva se u smjeru djelovanja sile.

III. Newtonov zakon: U međusobnom djelovanju dvaju tijela, ona djeluju jednakim, ali suprotno usmjerenim silama.

II. Newtonov zakon može se preoblikovati: kada je rezultantna sila F koja djeluje na neko tijelo mase m različita od nule, tada će se to tijelo gibati ubrzanjem a . II. zakon se formulom prikazuje:

$$F = m \times a \quad (2.1)$$

Na njemu se temelji i definicija mjerne jedinice za silu, ali on ipak nije pogodan kao osnovni princip za mjerenje sile, već se većina mjerenja vrši na tijelima u ravnoteži.

Prema SI sustavu mjerna jedinica za silu je **Newton [N]**. To je izvedena SI jedinica, što znači da nema međunarodno dogovorene vrijednosti za etalon kao npr. 1 metar ili 1 kilogram. 1 Newton definiran je kao sila koja masi od 1 kg daje ubrzanje od 1 m/s^2 [3].

Teško je u praksi dobiti 1 Newton iz ovakve definicije, tako da se standardno sile ostvaruju na temelju II. Newtonovog zakona primjenjenog u gravitacijskom polju Zemlje. Odnosno, tijelo poznate mase (m) podvrgava se djelovanju lokalnog gravitacijskog ubrzanja (g) te poznatom silom djeluje na potporu ($F = m \times g$). Sustavi koji na ovaj način proizvode silu nazivaju se **FSM – sustavima (Force Standard Machines)**.

2.2.MJERENJE SILE

Mjerenje sile vrlo je važno jer se na temelju toga određuju svojstva nekog materijala, dijela ili čitavog stroja. Mehanička svojstva materijala određuju kvalitetu nekog materijala, mogućnost njegove primjene te su važna za dimenzioniranje strojnih dijelova. Mjerenje sile u strojevima važno je zbog sigurnosti, montaže stroja i mogućnosti njegove primjene, kao i zbog razumijevanja i praćenja radnji za koje je stroj konstruiran. Dobra mjerenja, koja su u skladu s propisanim zahtjevima, imaju i značajan ekonomski utjecaj na neki proces ili uređaj te omogućuju pouzdanost uređaja.

Pri svakom mjerenju sile najvažnija je točnost mjerenja i mjerila te njihova usklađenost s istovrsnim mjerilima i mjerenjima drugih korisnika, bez obzira na različito vrijeme i lokaciju mjerenja. To je omogućeno postojanjem različitih etalona za silu, umjeravanjem istih i osiguranjem sljedivosti te postizanjem odgovarajućih mjernih nesigurnosti. **Mjerna nesigurnost** je sumnja u rezultat mjerenja, odnosno pokazatelj koliko je izmjereni rezultat blizu stvarnoj vrijednosti mjerene veličine. Ona je jedan od bitnih faktora za osiguranje mjerne sljedivosti.

Sila se može mjeriti na dva osnovna načina: direktno i indirektno. Direktnom metodom se sila mjeri na vagama za mjerenje sile, čiji je princip izravno uspoređivanje sile s poznatom gravitacijskom težinom utega standardne mase, pri čemu su točno poznate masa i gravitacija. Indirektnom metodom se mjeri učinak sile na neko tijelo i to na dva načina:

- mjerenjem akceleracije tijela poznate mase na kojeg djeluje sila,
- mjerenjem resultantnog učinka (deformacije) elastičnog elementa na kojeg djeluje sila.

Mjerenje uz pomoć elastičnog elementa ima najširu primjenu, a na taj način se sila mjeri i u prijenosnim etalonima.

Ono što je vrlo važno kod mjerenja sile je aksijalnost. Naime, svaka sila koja djeluje na tijelo može se kao vektorska veličina rastaviti na tri komponente prema Kartezijevom koordinatnom sustavu, a ravnoteža se može zasebno promatrati u smjeru svake od tri osi sustava. Mnogi mjerni sustavi će često reagirati pravilno samo na sile uzduž glavne osi mjernog sustava, a ako aktivne sile imaju i komponente u drugim smjerovima, rezultati mjerenja mogu biti netočni.

Mjerila sile prema namjeni mogu biti:

- ispitna: kidalice i preše,
- etalonska: prijenosni etaloni sile, referentni etaloni sile i nacionalni etaloni sile (njihov opis dan je u poglavlju 2.3.3.).

Na najnižoj razini piramide sljedivosti za mjerenje sile nalaze se **kidalice i preše**. To su uređaji koji služe za ispitivanje ponašanja materijala u uvjetima djelovanja sile (vlačne, tlačne, savojne ili smične). Način realizacije sile na kidalici može biti mehanički ili hidraulički, isto kao i način mjerenja sile. Kidalice se umjeravaju prijenosnim etalonima te se na taj način ostvaruje veza kroz piramidu sljedivosti prvo s referentnim, a dalje i s nacionalnim etalom.

2.3. SLJEDIVOST MJERENJA SILE

2.3.1. OPĆENITO O SLJEDIVOSTI

Sljedivost se može definirati kao: „svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonima neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti“ [4]. Sljedivost se ostvaruje neprekinutim nizom prijenosa vrijednosti neke veličine (umjeravanjem), počevši od etalona najviše mjeriteljske kakvoće (primarnog). Drugim riječima, da bi neko mjerilo za silu bilo valjano, mora se moći direktno povezati s primarnim etalom sile.

Osnovni elementi koji određuju sljedivost su:

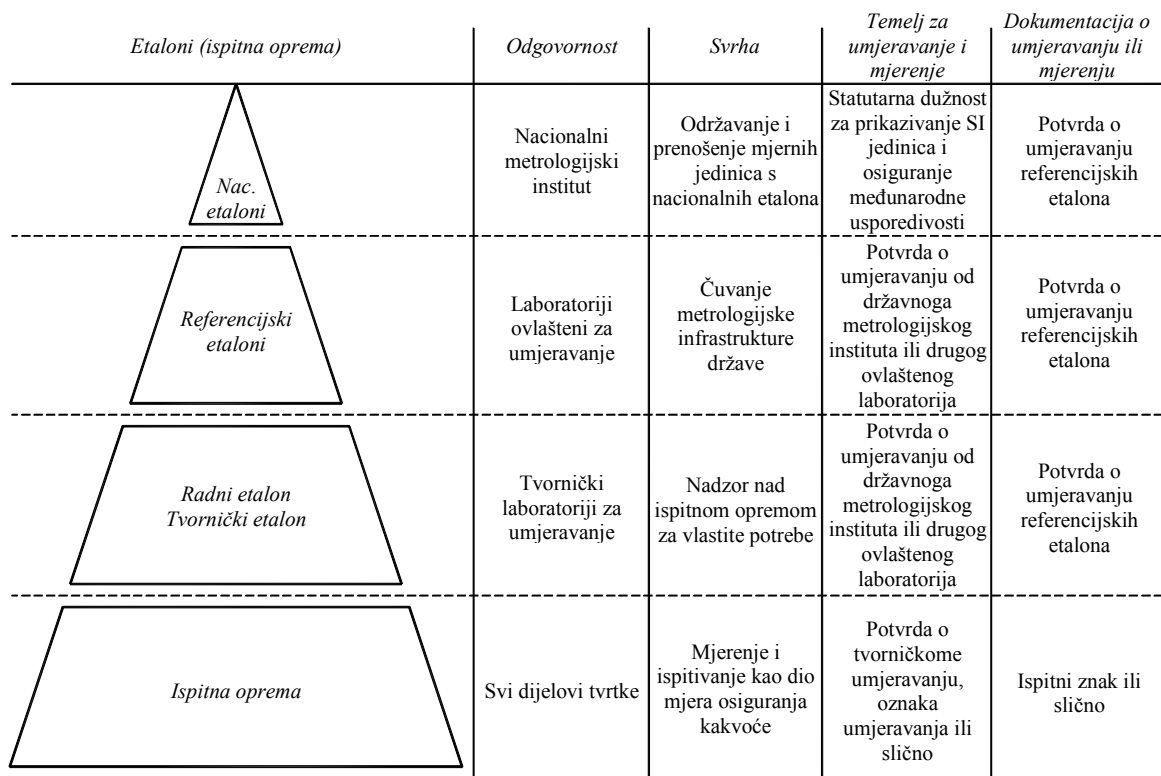
- neprekinuti lanac usporedbi kojim se može doći do etalona najviše mjeriteljske kakvoće,
- mjerna nesigurnost (za svaki dio lanca te za čitav lanac),
- dokumentacija za svaki korak u lancu,
- mjerodavnost laboratorija i tijela koji provode neke korake u lancu mora biti potkrijepljena dokazima,
- upućivanje na SI jedinice,
- ponovna umjeravanja u određenim vremenskim periodima.

Ovisno o tome o kakvim se mjerilima ili etalonima radi, te na kojem su oni položaju u lancu usporedbi, sljedivost je moguće ostvariti na više načina:

- preko umjernog laboratorija same tvrtke,
- preko ovlaštenog laboratorija,
- preko državne mjeriteljske ustanove,
- do međunarodnog etalona,
- do definicijskog etalona.

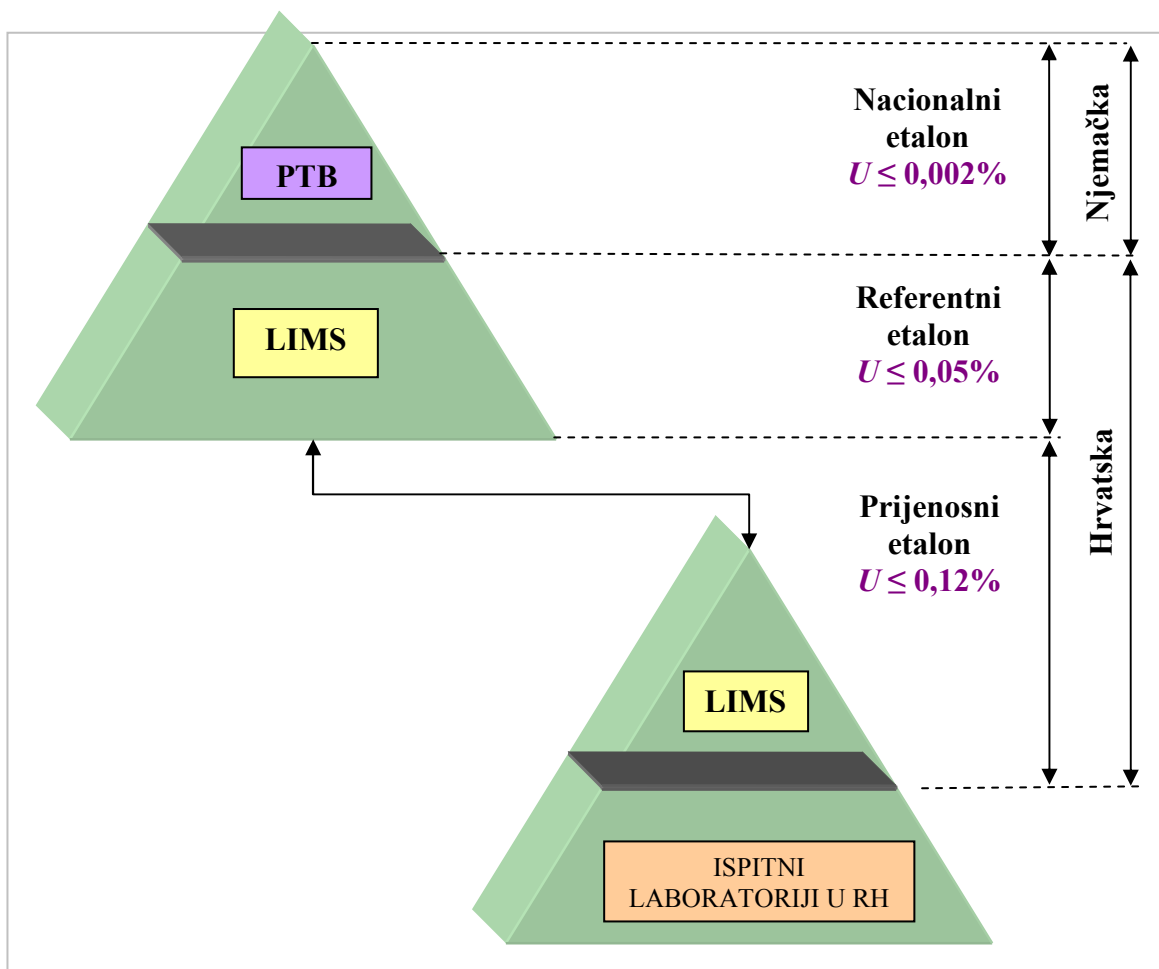
2.3.2. SHEMA SLJEDIVOSTI

Neprekinuti lanac usporedbi koji osigurava sljedivost određuje i shemu, tj. **piramidu sljedivosti**. U toj piramidi etaloni i mjerni uređaji posloženi su hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći. Pomoću etalona više razine umjerava se etalon niže razine i tako sve do mjerila i ispitne opreme kao što je npr. kidalica, koja je na najnižoj razini piramide. Dakle, umjeravanje ide s vrha prema dnu piramide. Piramida sljedivosti prikazana je slikom 1.

<i>Etaloni (ispitna oprema)</i>	<i>Odgovornost</i>	<i>Svrha</i>	<i>Temelj za umjeravanje i mjerenje</i>	<i>Dokumentacija o umjeravanju ili mjerenju</i>
 <i>Nac. etaloni</i>	Nacionalni metrološki institut	Održavanje i prenošenje mjernih jedinica s nacionalnih etalona	Statutarna dužnost za prikazivanje SI jedinica i osiguranje međunarodne usporedivosti	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
<i>Referencijski etaloni</i>	Laboratoriji ovlašteni za umjeravanje	Čuvanje metrološke infrastrukture države	Potvrda o umjeravanju od državnoga metrološkog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
<i>Radni etalon Tvornički etalon</i>	Tvornički laboratoriji za umjeravanje	Nadzor nad ispitnom opremom za vlastite potrebe	Potvrda o umjeravanju od državnoga metrološkog instituta ili drugog ovlaštenog laboratorija	Potvrda o umjeravanju referencijskih etalona
<i>Ispitna oprema</i>	Svi dijelovi tvrtke	Mjerenje i ispitivanje kao dio mjera osiguranja kakvoće	Potvrda o tvorničkome umjeravanju, oznaka umjeravanja ili slično	Ispitni znak ili slično

Slika 1: Piramida sljedivosti [5]

Što se tiče etalona za silu, u Hrvatskoj nema nacionalnog etalona, već je odgovarajući nacionalni etalon u ovom dijelu Europe u njemačkom nacionalnom mjeriteljskom institutu PTB (Physikalisch – Technische Bundesanstalt). No Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje ovlašten je laboratorij za umjeravanje u kojem se nalazi referentnim etalom za silu. Piramida sljedivosti etalona za silu za Hrvatsku prikazana je slikom 2.



Slika 2: Piramida sljedivosti etalona za silu u Hrvatskoj s pripadnim proširenim mjernim nesigurnostima [6]

2.3.3. ETALONI SILE

Općenito se **etalon** može definirati kao „materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogli poslužiti kao referencija“ [4]. Drugim riječima, etalon služi da bi se s njime uspoređivale sukladne mjere ili mjerila, kako bi krajnji korisnik dobio zadovoljavajuću točnost i pouzdanost mjerenja. Važno je da u slučaju sile etalon nije materijalizirana mjera (kao npr. 1 kilogram), već mjerilo.

Etalon najviše mjeriteljske kakvoće je **primarni etalon**. On se koristi isključivo za usporedbe s rezervnim ili referentnim etalom, a ne koristi se za izravna mjerenja. Njegove vrijednosti se prihvaćaju bez pozivanja na ostale etalone iste kakvoće.

Budući da je Newton izvedena jedinica u SI sustavu, kod etalona za silu ne postoji primarni etalon na međunarodnoj razini, nego su na najvišoj mjeriteljskoj razini **primarni nacionalni etaloni** za silu. Oni predstavljaju osnovu za utvrđivanje vrijednosti svih ostalih etalona, jer su na najvišoj razini piramide sljedivosti. Zbog toga se oni ne mogu sami umjeriti u nekom drugom etalonu, već se njihova mjeriteljska kakvoća provjerava u programima međulaboratorijskih usporednih ispitivanja. Kod primarnih nacionalnih etalona sila se ostvaruje direktno, isključivo preko utega, a ne polugama i sličnim elementima, pri čemu je masa utega određena preko referentnih etalona mase, a posljedica toga je relativna nesigurnost mjerenja manja ili jednaka 2×10^{-5} . Slika 3 prikazuje primarni etalon sile nazivne sile 1 MN u PTB-u.



Slika 3: Primarni etalon za silu nazivne sile 1 MN, PTB, Njemačka [7]

Referentni etaloni u piramidi sljedivosti su na razini niže od nacionalnih, a imaju najvišu mjeriteljsku kakvoću na nekom području, u kojem se koriste za sva mjerenja, te na taj način osiguravaju sljedivost između nacionalnog etalona i ostalih etalona i mjerila. Nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima. Oni su stabilni uređaji za mjerenje sile, različitih najboljih mjernih sposobnosti, koje ovise o realizacije sile u njima, tj. mehanizmu opterećenja. Mogući mehanizmi s pripadajućim nesigurnostima prikazani su u tablici 1, gdje je vidljivo da je mjerna nesigurnost najmanja kod opterećenja utezima (što je i razlog da se tako sila ostvaruje kod primarnih etalona).

Tablica 1: Referentni etaloni prema mehanizmima opterećenja i pripadne najbolje mjerne sposobnosti (proširene relativne mjerne nesigurnosti) [6]

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja	Najbolja mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećivanja direktno utezima	5×10^{-5} do 1×10^{-4}
Hidraulični mehanizam opterećivanja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Polužni mehanizam opterećivanja	1×10^{-4} do 5×10^{-4}
Komparatorni sustav	do 5×10^{-3}

Prijenosni etaloni namijenjeni su prijenosu vrijednosti sile na različita mjesta, zbog čega su ponekad posebne konstrukcije. Koriste se za umjeravanje drugih etalona ili uređaja za mjerenje sile (npr. kidalica) koji su na nižoj mjeriteljskoj razini od referentnog etalona, a sami se umjeravaju na referentnim (ili rjeđe primarnim) etalonima. Detaljniji opis prijenosnih etalona dan je u poglavlju 2.3.4.

2.3.4. PRIJENOSNI ETALONI SILE

Prijenosni etaloni većinom pripadaju mjerilima sile s elastičnim elementom. Sastoje se od četiri osnovne komponente:

- dinamometra određenog razreda sile (deformacijsko tijelo),
- mjernog pojačala,
- uređaja za očitavanje,
- kabela kojima je ostvarena fizička veza između komponenti.

Pri tome uređaj za očitavanje i mjerno pojačalo najčešće čine jedan sklop. Sve skupa može biti priključeno i na računalo, čime se znatno olakšava i ubrzava prikupljanje i obrada podataka umjeravanja. Kompletan pribor za umjeravanje prijenosnim etalonom prikazan je slikom 4.



Slika 4: Kompletan pribor prijenosnog etalona [8]

Dinamometri se mogu razlikovati prema smjeru opterećenja i prema vrsti deformacije. Moguća opterećenja su:

- vlak,
- tlak,
- univerzalno (vlak i tlak).

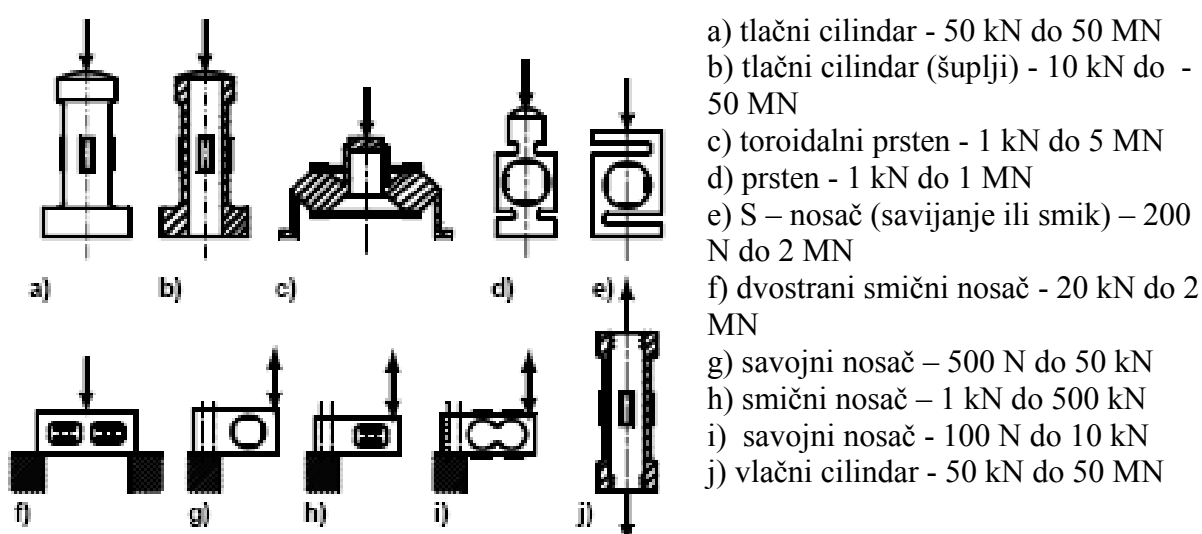
Deformacija može biti:

- promjena duljine,
- promjena volumena,
- električna ili magnetna promjena.

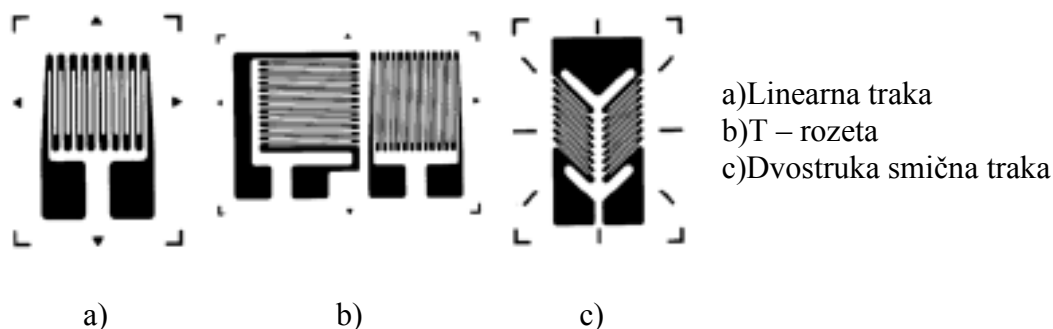
Dinamometar se sastoji od tri osnovna elementa: kućišta, elastičnog elementa i elemenata s određenim električnim otporom, npr. DMS mjerne trake pričvršćene na elastični element. Osnovne funkcije kućišta su:

- omogućiti montažu dinamometra u drugi uređaj,
- omogućiti pravilan prijenos sile,
- štititi unutarnje elemente od vanjskih utjecaja,
- onemogućiti ometanje mjerenja nepoželjnim silama.

Elastični elementi mogu biti opruge, prstenovi, mjerne ćelije itd. U odnosu na mehaničke elemente, njihova prednost je u maloj masi, a većoj preciznosti. Mjerenje sile takvim elementima je indirektno. Neki oblici elastičnih elemenata prikazani su slikom 5. Neki tipovi DMS traka prikazani su slikom 6.

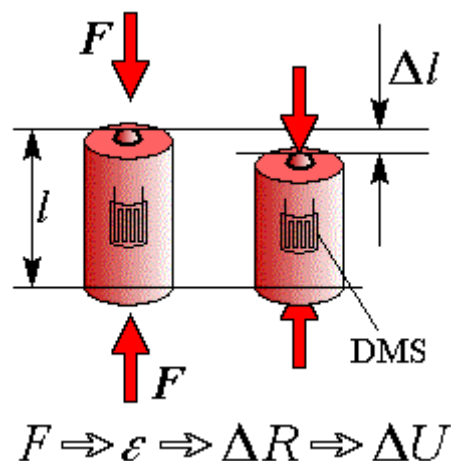


Slika 5: Tipovi elastičnih elemenata s dopuštenim opterećenjima [1]



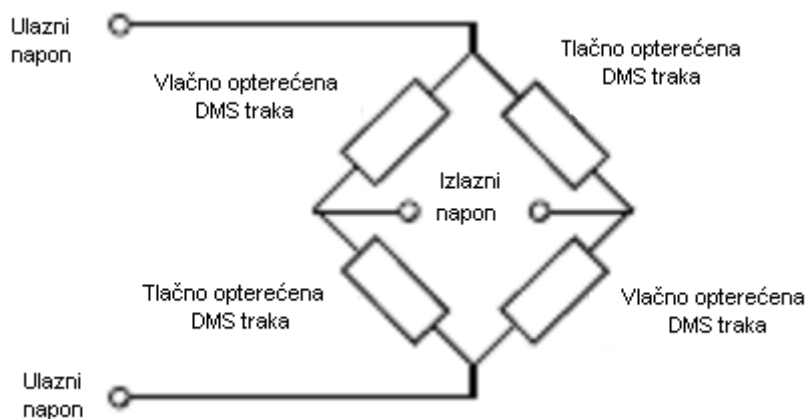
Slika 6: Tipovi DMS traka [1]

Princip mjerenja sile prijenosnim etalonom je sljedeći:
Kada određena sila djeluje na dinamometar, tj. na deformacijsko tijelo, on će se produljivati ili skraćivati, ovisno o smjeru sile. Zajedno s njim deformirat će se i DMS trake. DMS trake su zavojnice od metalne folije ili trake koje imaju neki električni otpor koji ovisi o njihovim dimenzijama. Uslijed širenja ili stezanja traka, mijenja se i njihov otpor (slika 7).



Slika 7: Primjer indirektnog mjerenja sile pomoću DMS traka [7]

DMS trake povezuju se u Wheatstonov most (slika 8). Tako se iz promjene otpora traka dobiva promjena napona u mostu koju je lakše bilježiti i očitavati. Ona se iskazuje u jedinici mV/V.



Slika 8: Položaj DMS mjernih traka u Wheatstonovom mostu [1]

Promjena otpora proporcionalna je promjeni sile, a promjena napona je proporcionalna promjeni otpora pa je automatski i napon proporcionalan sa silom.

Neki od dinamometara prijenosnih etalona Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) prikazani su slikom 9.

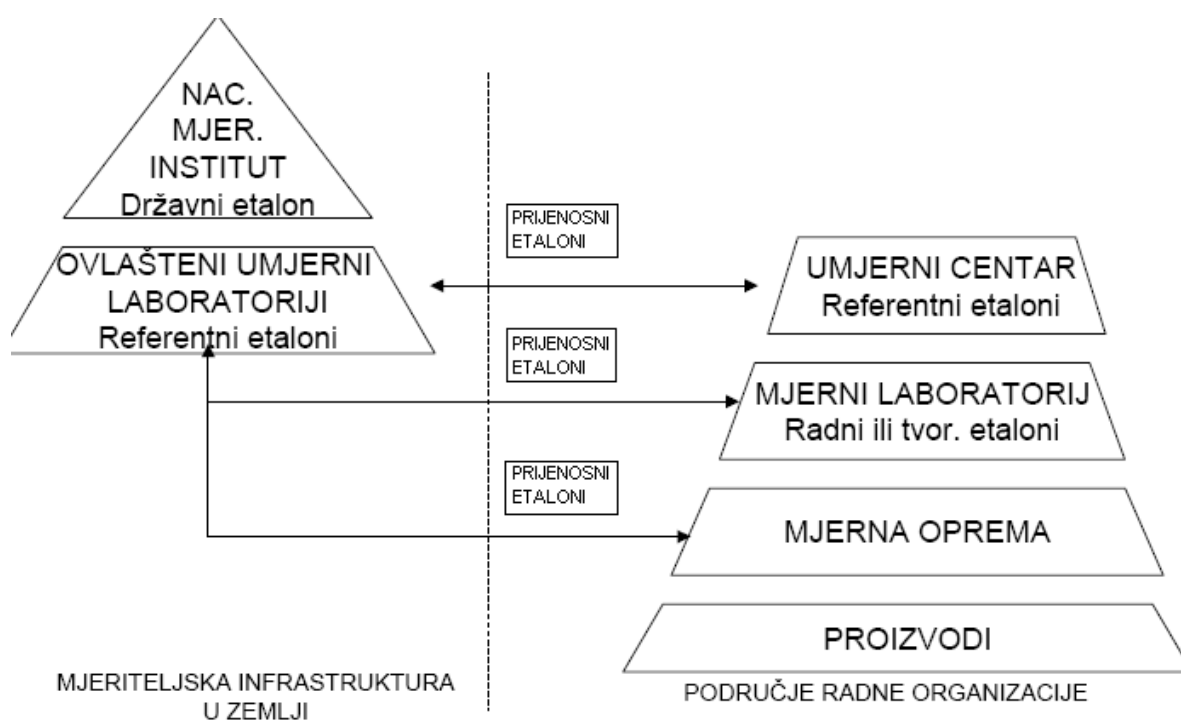


Slika 9: Dinamometri prijenosnih etalona LIMS-a [5]

3. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE

3.1. OPĆENITO O UMJERAVANJU

Umjeravanje je postupak kojim se određuje odnos između veličine koju pokazuje mjerilo ili etalon sile niže mjeriteljske razine i odgovarajuće vrijednosti ostvarene etalomom sile više mjeriteljske razine. Svaki etalon ili mjerilo uvijek se umjerava s etalomom na višoj razini u piramidi sljedivosti prema općenitoj shemi na slici 10.



Slika 10: Shema umjeravanja [4]

U toku uporabe uređaji za mjerenje sile gube na svojoj mjeriteljskoj kvaliteti zbog oštećenja, kvarova, preopterećenja, istrošenja nekih dijelova itd. Umjeravanje se zato mora vršiti u određenim vremenskim periodima kako bi se redovito kontrolirala ispravnost i zadovoljavajuća mjerna nesigurnost mjerila i etalona. Umjeravanje svakog uređaja mora se vršiti u skladu s odgovarajućom normom jer jedino je na taj način moguće usklađivati i uspoređivati rezultate različitih mjerenja izvršenih od strane različitih mjeritelja na različitim mjernim uređajima. Europske norme koje se bave umjeravanjem mjernih uređaja za silu su ISO 7500-1 i EN ISO 376.

Umjeravanje mjerila i etalona sile nužno je, da se osigura odgovarajuća preciznost mjerila i traženi stupanj nesigurnosti, kako bi korisnik imao povjerenje u rezultat mjerenja. Redovitim umjeravanjem etalona i mjerila osigurava se sljedivost. Upravo su postupci umjeravanja ono što dovodi neko mjerilo ili etalon niže razine u direktnu vezu s primarnim etalomom.

Mjerila i etaloni sile mogu se umjeravati sljedećim metodama:

- standardnim utezima,
- izbalansiranim polugama i standardnim utezima,
- elastičnim uređajima (prijenosni etaloni),
- kontrolnim epruvetama.

Osnovna ideja umjeravanja je usporedba poznatih ulaznih veličina kojima se opterećuje etalon ili mjerilo s izlaznim vrijednostima koje se očitavaju na njemu. Ulazna veličina ima neku utvrđenu mjernu nesigurnost koja se mora uzeti u obzir. Na rezultate mjerenja i njihovu mjernu nesigurnost mogu utjecati različiti vanjski i unutarnji faktori.

Vanjski utjecajni faktori su oni koji nisu vezani uz sami mjerni uređaj, a tu se mogu svrstati:

- uvjeti okoliša,
- rukovanje,
- umjerna oprema,
- software,
- umjeravana oprema,
- obrada podataka i
- mjerna strategija.

Unutarnji utjecajni faktori ovise o samom mjernom uređaju:

- dinamometar,
- mjerno pojačalo,
- software,
- prihvat,
- kabel i
- ostalo.

Postupak umjeravanja prijenosnih etalona određen je normom EN ISO 376, na čemu će se temeljiti i umjeravanje tri etalona u eksperimentalnom dijelu projekta.

3.2. UMJERAVANJE PRIJENOSNIH ETALONA SILE PREMA NORMI EN ISO 376

Pravila za umjeravanje etalona prema normi EN ISO 376 odnose se na one etalone koji se koriste za umjeravanje uređaja za jednoosna tlačna i vlačna naprezanja [9]. Također, u tim etalonima sila se mjeri indirektno, i to na temelju mjerenja elastične deformacije dinamometra.

Prema ovoj normi pod pojmom etalona smatra se čitav sklop koji se sastoji od dinamometra, pretvarača signala i uređaja za očitavanje.

Osnovne oznake značajne u postupku umjeravanja prijenosnog etalona prikazane su tablicom 2.

Tablica 2: Veličine pri umjeravanju prijenosnih etalona

Simbol	Jedinica	Veličina
b	%	Relativna greška ponovljivosti s rotacijom
b'	%	Relativna greška obnovljivosti bez rotacije
F_f	N	Nazivna sila dinamometra
F_N	N	Maksimalna sila umjeravanja
f_c	%	Relativno interpolacijsko odstupanje
f_0	%	Relativno odstupanje nul vrijednosti
i_f	-	Očitavanje na indikatoru nakon rasterećenja
i_0	-	Očitavanje na indikatoru prije opterećenja
r	N	Rezolucija indikatora
v	%	Relativna greška histereze
X	-	Izmjerena vrijednost pri rastućoj sili
X_a	-	Interpolirana vrijednost otklona
X'	-	Izmjerena vrijednost pri padajućoj sili
X_{\max}	-	Maksimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_{\min}	-	Minimalna izmjerena vrijednost iz nizova 1, 3 i 5
X_N	-	Otklon koji odgovara maksimalnoj sili umjeravanja
X_{sf-r}	-	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri različitom položaju
X_{sf-wt}	-	Srednja vrijednost očitavanja kod opterećivanja pri istom položaju

Umjeravanje se sastoji od djelovanja poznatom silom na dinamometar i od bilježenja očitavanja na indikatoru.

3.2.1. KARAKTERISTIKE ETALONA

Svi dijelovi etalona moraju biti zasebno identificirani, pri čemu je za dinamometar važno naznačiti nazivnu silu.

Dinamometar i dijelovi za povezivanje s opterećenjem moraju biti konstruirani i dimenzionirani tako da osiguraju aksijalno djelovanje sile (bilo vlačne, bilo tlačne).

Deformacija opterećenog elastičnog elementa može se mjeriti mehanički, električki, optički ili na neki drugi način, ali s odgovarajućom točnošću i stabilnošću. Način i kvaliteta mjerenja deformacije mogu utjecati na rezultate mjerenja, a time i na klasifikaciju etalona sile.

3.2.2. PRIPREMA ZA UMJERAVANJE

Prije umjeravanja potrebno je provjeriti da li se etalon uopće može umjeriti. To se može ispitati preliminarnim testovima kao što je test preopterećenjem. U tome se testu četiri puta zaredom etalon izlaže preopterećenju koje bi trebalo biti veće od nazivne sile najmanje 8%, a najviše 12%. Trajanje preopterećenja iznosi od 1 do 1,5 minuta. Barem jedan takav test treba izvršiti proizvođač prije nego što se etalon počne koristiti.

Dalje treba osigurati:

- kod vlačnih ispitivanja – da priključni dijelovi mogu osigurati aksijalnu silu,
- kod tlačnih ispitivanja – da nema interakcije između dinamometra i njegove potpore na uređaju na kojem se umjerava etalon.

Za električne uređaje treba provjeriti da varijacija linijskog napona od $\pm 10\%$ neće imati značajni utjecaj na umjeravanje.

3.2.3. REZOLUCIJA (r)

Rezolucija je ona minimalna promjena ulazne veličine za koju se još detektira promjena izlazne veličine.

Kod analogne skale udaljenosti susjednih oznaka na skali trebaju biti jednake, a debljina kazaljke i oznaka približno ista. Rezolucija treba biti određena iz omjera širine kazaljke i središnje udaljenosti dvije susjedne oznake na skali (preporučeni su omjeri: 1:2, 1:5, 1:10). Kod digitalne skale rezolucija je jedan prirast zadnje aktivne znamenke brojanog indikatora.

Rezolucija treba biti prebačena u mjernu jedinicu za silu. Ako očitavanja za neopterećeni uređaj kolebaju više od prije izračunate rezolucije, potrebno je rezoluciju u neopterećenom i mirujućem stanju uvećati za jednu polovinu raspona kolebanja.

3.2.4. MINIMALNA SILA

S obzirom na točnost kojom se može očitati otklon na uređaju u toku umjeravanja ili u toku daljnje upotrebe, minimalna sila F_{\min} koja se primjenjuje na etalonu mora zadovoljiti 2 uvjeta:

1. Za određenu klasu mora iznositi:

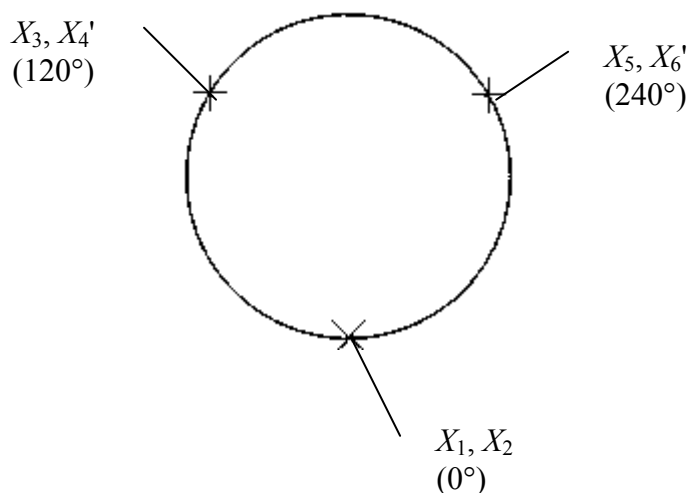
Klasa etalona	F_{\min}
00	$\geq 4000 \times r$
0,5	$\geq 2000 \times r$
1	$\geq 1000 \times r$
2	$\geq 500 \times r$

2. Minimalna sila mora biti jednaka ili veća od $0,02 F_f$ - maksimalnog kapaciteta dinamometra.

3.2.5. POSTUPAK UMJERAVANJA

Prije nego što se etalon optereti silama za umjeravanje u zadanom smjeru (tlak ili vlak), potrebno ga je predopteretiti. Na uređaj se treba tri puta djelovati maksimalnom silom, svaki puta u trajanju od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja moraju biti u istom smjeru i moraju djelovati na istom položaju kao i opterećenje, tj. sila koja slijedi nakon njih. Prije svake promjene smjera opterećenja u toku umjeravanja, potrebno je predopteretiti etalon u tom novom smjeru.

Silama za umjeravanje etalon se opterećuje u ukupno 6 mjernih nizova (slika 11.). Prva dva niza sila (X_1 i X_2) su nizovi rastućih iznosa sila, bez da se mijenja položaj dinamometra (tj. položaj na 0°). Zatim slijede još četiri niza opterećenja. Treći niz (X_3) je rastući, a četvrti (X_4') padajući, oni imaju isti korak, a određuju se za položaj dinamometra zarotiranog za 120° . Zatim se dinamometar rotira na položaj 240° od početnog te se opterećuje petim nizom rastućih sila (X_5) i šestim nizom opadajućih (X_6').



Slika 11: Pozicije mjernih nizova na dinamometru umjeravanog etalona [9]

Da bi se mogla odrediti interpolacijska krivulja za rezultate umjeravanja, potrebno je po svakom mjernom nizu imati barem osam mjernih točaka sila različitih iznosa, a one trebaju biti što ravnomjernije raspoređene unutar raspona sile u mjernom nizu.

U svakom mjernom nizu bilježe se i nulta očitavanja (kad ne djeluje sila), i to prije početka djelovanja sile i nakon djelovanja sile najmanje 30 sekundi, a između susjednih nizova mjerenja treba pričekati barem 3 minute. Značajnija promjena nulnih očitavanja može ukazivati na plastičnu deformaciju uslijed preopterećenja dinamometra. Vremenski intervali između mjernih točaka unutar jednog mjernog niza trebaju biti što sličniji, a očitavanja bi se trebala raditi nakon najmanje 30 sekundi od početka djelovanja opterećenja.

U toku umjeravanja uređaji s odvojivim dijelovima trebali bi se barem jednom rastaviti, uglavnom između drugog i trećeg mjernog niza, a nakon sastavljanja potrebno je ponovno predopteretiti uređaj maksimalnom silom i to barem tri puta.

Temperatura bi u toku umjeravanja trebala biti između 18° i 28° C i stabilna s promjenom najviše $\pm 1^{\circ}$ C. Temperaturu treba zabilježiti te treba omogućiti etalonu da postigne stabilnu temperaturu.

3.2.6. KRITERIJI OCJENJIVANJA PRIJENOSNOG ETALONA

Kriteriji za klasifikaciju prijenosnih etalona sile, sukladno normi EN ISO 376, su:

- relativna greška ponovljivosti s rotacijom,
- relativna greška obnovljivosti bez rotacije,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna greška histereze.

Relativna greška ponovljivosti s rotacijom (b) računa se za svaku silu umjeravanja, na temelju mjernih nizova 1, 3 i 5, iz sljedećih izraza:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\text{sr-r}}} \right| \times 100\%, \quad (3.1)$$

$$\text{gdje je } X_{\text{sr-r}} = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}. \quad (3.2)$$

Relativna greška obnovljivosti bez rotacije (b') također se računa za svaku silu umjeravanja, na temelju nizova 1 i 2, prema izrazu:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{X_{\text{sr-wr}}} \right| \times 100\%, \quad (3.3)$$

$$\text{gdje je } X_{\text{sr-wr}} = \frac{X_1 + X_2}{2}. \quad (3.4)$$

Relativno interpolacijsko odstupanje (f_c) određuje se za polinom 1., 2., 3. (ili višeg stupnja) koji određuje ovisnost izlaznih podataka o sili, a dobiven je iz rezultata mjerenja. Iz te vrijednosti može se procijeniti koliko dobro točke interpolirane polinomom X_a aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Ona se računa iz izraza:

$$f_c = \frac{X_{\text{sr-r}} - X_a}{X_a} \times 100\%. \quad (3.5)$$

Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0) dobiva se iz očitavanja nul vrijednosti prije i poslije svakog mjernog niza, i to oko 30 sekundi nakon rasterećenja, prema izrazu:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100\% . \quad (3.6)$$

Kod klasifikacije etalona u razmatranje se uzima najveće dobiveno odstupanje nul vrijednosti.

Relativna greška histereze (v) računa se pri umjeravanju za susjedne mjerne nizove kod kojih je jedan rastući, a drugi opadajući. Histereza znači da pri istoj ulaznoj sili, izlazne vrijednosti neće biti jednake u rastućem i u opadajućem nizu. Iz razlike tih vrijednosti računa se relativna greška histereze:

za mjerne nizove s rotacijom dinamometra za 120° $v_1 = \left| \frac{X_4' - X_3}{X_3} \right| \times 100\% , \quad (3.7)$

te za mjerne nizove s rotacijom dinamometra za 240° $v_2 = \left| \frac{X_6' - X_5}{X_5} \right| \times 100\% , \quad (3.8)$

a konačna vrijednost pri nekoj sili je njihova aritmetička sredina: $v = \frac{v_1 + v_2}{2} . \quad (3.9)$

3.2.7. KLASIFIKACIJA PRIJENOSNIH ETALONA

Raspon za koji se klasificira uređaj određuje se tako da se u obzir uzima svaka mjerna točka umjeravanja, jedna za drugom, počevši od maksimalne pa prema minimalnoj. Raspon klasifikacije završava kod zadnje sile za koju su još zadovoljeni uvjeti klasifikacije, a on bi trebao pokriti područje od barem 50 – 100% nazivne sile F_N .

Prijenosni etalon može biti klasificiran ili za točno određene vrijednosti sile ili za interpolirane vrijednosti sile. Kod etalona za točno određene vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne greška ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna greška histereze.

Kod etalona za interpolirane vrijednosti sile kriteriji za klasifikaciju su:

- relativne greška ponovljivosti i obnovljivosti,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna greška histereze.

Prema iznosima zadanih kriterija određuje se kojoj od četiri klase pripada umjeravani prijenosni etalon (tablica 3.). Da bi etalon u nekom mjernom području pripadao određenoj klasi, moraju istovremeno biti zadovoljeni baš svi kriteriji. Ako samo jedan kriterij nije zadovoljen, tada će etalon pripadati klasi određenoj tim kriterijem.

Tablica 3: Klase prijenosnih etalona i odgovarajuće vrijednosti kriterija [9]

Klasa	Relativne pogreške, %					Nesigurnost primjenjene sile umjeravanja, % (za $k = 2$)
	b	b'	f_c	f_0	v	
00	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
0,5	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
1	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30	$\pm 0,05$
2	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50	$\pm 0,10$

3.2.8. POTVRDE O UMJERAVANJU

Za etalon koji je zadovoljio u postupku umjeravanja prema ovoj normi izdaje se potvrda o umjeravanju koja mora sadržavati sljedeće:

- podatke o svim dijelovima prijenosnog etalona kao i podatke o uređaju na kojem je umjeravan,
- način primjene sile (vlak ili tlak),
- potvrdu da je etalon u skladu sa zahtjevima preliminarnih testova,
- klasu i mjerno područje (ili specifične sile) za koje se može koristiti,
- datum, rezultate umjeravanja i ako je potrebno interpolacijsku krivulju,
- temperaturu na kojoj je izvršeno umjeravanje.

Ovakva potvrda važeća je najviše 26 mjeseci, nakon čega se prijenosni etalon mora ponovo umjeriti. Etalon se umjerava i ranije ako je bio preopterećen silom većom od sile preopterećenja propisane u pripremi za umjeravanje. Također, potrebno ga je ponovo umjeriti nakon eventualnog popravka.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. PLAN EKSPERIMENTA

U eksperimentalni dijelu projekta proveden je postupak umjeravanja prijenosnih etalona sile, obrađeni su dobiveni rezultati mjerenja i provedena je analiza rezultata. Umjeravana su tri prijenosna etalona s dinamometrima tipa Z4 i to pri tlačnom opterećenju za nazivne sile 100 kN, 200 kN i 500 kN.

Umjeravanje prijenosnih etalona izvršeno je na referentnom etalonu sile proizvođača GTM prema normi EN ISO 376. Prvo je etalon tri puta bio predopterećen na iznos svoje nazivne sile i to u početnoj poziciji, zakrenut za 120° i zakrenut za 240° . Nakon toga izmjereno je ukupno šest nizova: X_1 , X_2 , X_3 i X_5 za rastuće vrijednosti sile te X_4' i X_6' za opadajuće vrijednosti sile. Nakon niza X_2 dinamometar se rotirao za 120° , a nakon niza X_4 za 240° . Pauze nakon svakog predopterećenja iznosile su 60 sekundi, a nakon svakog niza mjerenja 180 sekundi.

Promjenu deformacije elastičnog elementa u dinamometru električno pojačalo pokazuje kao promjenu napona u mV/V. Pri tome se promjena napona bilježila za svaku promjenu sile za konstantan korak, koji ovdje za sve etalone iznosi 10% nazivne sile. Također su bilježene i nul vrijednosti.

Nakon mjerenja dobiveni podaci su obrađeni, pri čemu je bilo važno naći odgovarajuću vezu između sile i pripadajućeg pomaka, tj. promjene. Ta se veza za svaki etalon prikazuje grafički te opisuje matematički, polinomom nekog stupnja koji se naziva jednadžba umjeravanja. Moguće je koristiti polinome različitih stupnjeva, a u ovom projektu prikazani su i uspoređeni linearni prikaz i polinomi 2., 3. i 5. stupnja. Pomoću polinoma dalje su interpolacijom dobivene vrijednosti izlazne promjene napona za iznose sila primjenjenih u mjernim nizovima. Osim jednadžbi umjeravanja, iz podataka mjerenja izračunati su za svaki etalon i kriteriji za klasifikaciju etalona. Kriteriji su prikazani i grafički u odnosu na promjenu primjenjene sile.

4.2. OSNOVNI PODACI O REFERENTNOM ETALONU

Umjeravanje prijenosnih etalona izvršeno je na referentnom etalonu proizvođača GTM-a u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje (slika 12), čije su osnovne karakteristike prikazane su u tablici 4.

Tablica 4: Karakteristike referentnog etalona sile [6]:

KARAKTERISTIKE REFERENTNOG ETALONA SILE	
Proizvođač	GTM, Njemačka
Mjerno područje	10 – 500 kN
Nazivna sila	500 kN
Način opterećenja	hidraulički
Smjer opterećenja	Vlak, tlak
Ponovljivost	1×10^{-04}
Očekivana mjerna nesigurnost	< 0,05 %
Mjerni sustav	mjerno pojačalo, dvostruko složeni dinamometri



Slika 12: Referentni etalon sile Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava (FSB) [6]

Referentni etalon ima mjerni sustav komparatornog tipa, tj. pretvara deformaciju u dinamometru u izlazni električni signal. Široko mjerno područje i visoka mjerna sposobnost osigurani su modelom dvostruko složenih visoko preciznih dinamometara (KTN 100 kN i KTN 500 kN) prikazanih na slici 13.



Slika 13: Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona [6]

4.3. UMJERAVANI PRIJENOSNI ETALONI

Umjeravani etaloni sastoje se od dinamometra i mjernog pojačala. Dinamometri su tipa Z4, nazivnih sila redom 500 kN, 200 kN i 100 kN, za tlačno opterećenje (slika 14). Korišteno je pojačalo tipa MGC plus s uređajem za očitavanje AB12, koji su ugrađeni u zajedničko kućište (slika 15).



Slika 14: Dinamometri tipa Z4, slijeva na desno: Z4/500 kN, Z4/200 kN, Z4/100 kN



Slika 15: MGC plus mjerno pojačalo [10]

4.4. REZULTATI UMJERAVANJA

Ispitivanje je provedeno na tri prijenosna etalona različitih nazivnih sila, a podaci mjerenja su istovjetno obrađeni za sve etalone. Za etalon Z4/500 kN dobiveni podaci su detaljnije objašnjeni, pri čemu sva objašnjenja jednako vrijede i za etalone Z4/100 kN i Z4/200 kN, za koje su dani podaci bez detaljnijih pojašnjenja u prilogima I i II.

4.4.1. REZULTATI MJERENJA

Prije provedbe mjernih nizova, etalon Z4/500 kN tri puta je predopterećen na iznos nazivne sile 500 kN pri čemu su zabilježena očitavanja kod nazivne vrijednosti kao i očitavanja prije opterećenja i nakon rasterećenja. U tablici 5 prikazani su rezultati mjerenja predopterećenja s pripadnim relativnim odstupanjem nul vrijednosti izračunatim prema izrazu 3.6.

Tablica 5: Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4/500 kN

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	2,00109	2,00126	2,00126
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	-0,00008	-0,00005	-0,00005
Relativno odstupanje nul vrijednosti kod predopterećenja, %	-0,00400	-0,00250	-0,00250

U tablici 6 prikazani su rezultati umjeravanja prijenosnog etalona Z4/500kN. Kako je korak sile iznosio 10% nazivne sile, svaki mjerni niz sadrži po 10 mjernih točaka, a na početku i na kraju svakog niza očitane su i nul vrijednosti.

Tablica 6: Rezultati umjeravanja etalona Z4/500kN

Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	$X_1, \text{mV/V}$	$X_2, \text{mV/V}$	$X_3, \text{mV/V}$	$X_4', \text{mV/V}$	$X_5, \text{mV/V}$	$X_6', \text{mV/V}$
0	0,00000	0,00000	0,00000	-0,00004	0,00000	-0,00003
50	0,20033	0,20033	0,20033	0,20025	0,20032	0,20024
100	0,40054	0,40054	0,40055	0,40035	0,40053	0,40034
150	0,60062	0,60063	0,60063	0,60038	0,60063	0,60038
200	0,80069	0,80068	0,80071	0,80039	0,80070	0,80039
250	1,00079	1,00080	1,00081	1,00048	1,00082	1,00047
300	1,20082	1,20084	1,20084	1,20048	1,20086	1,20050
350	1,40090	1,40091	1,40092	1,40056	1,40094	1,40057
400	1,60101	1,60103	1,60104	1,60070	1,60106	1,60072
450	1,80105	1,80106	1,80107	1,80085	1,80110	1,80088
500	2,00117	2,00118	2,00119	2,00119	2,00123	2,00123
0	-0,00008	-0,00007				

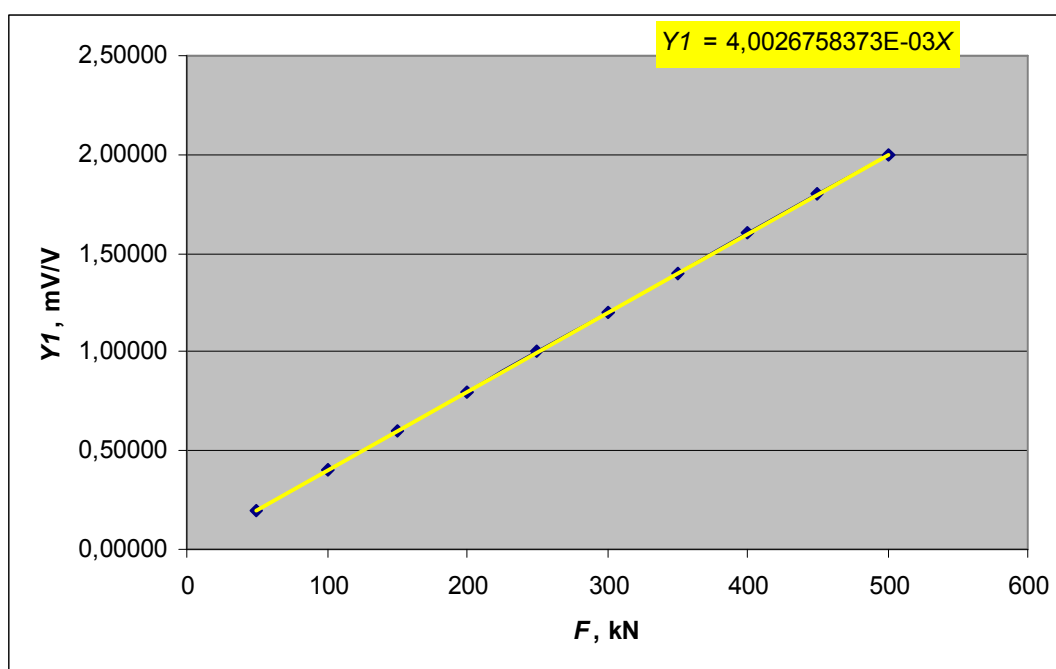
4.4.2. INTERPOLACIJSKE KRIVULJE

Rezultati mjerenja ukazuju na vezu između primjenjene sile i očitane promjene napona, a ona se prikazuje polinomom nekog stupnja. Za dobivanje odgovarajućeg polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata koja dobro kompenzira i neke nesavršenosti koje mogu utjecati na oblik interpolacijske krivulje.

Najjednostavniji je polinom 1. stupnja, tj. pravac, koji se još naziva linearizacijom. Kod prikaza rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN pravcem (slika 16), dobiva se sljedeća jednadžba umjeravanja:

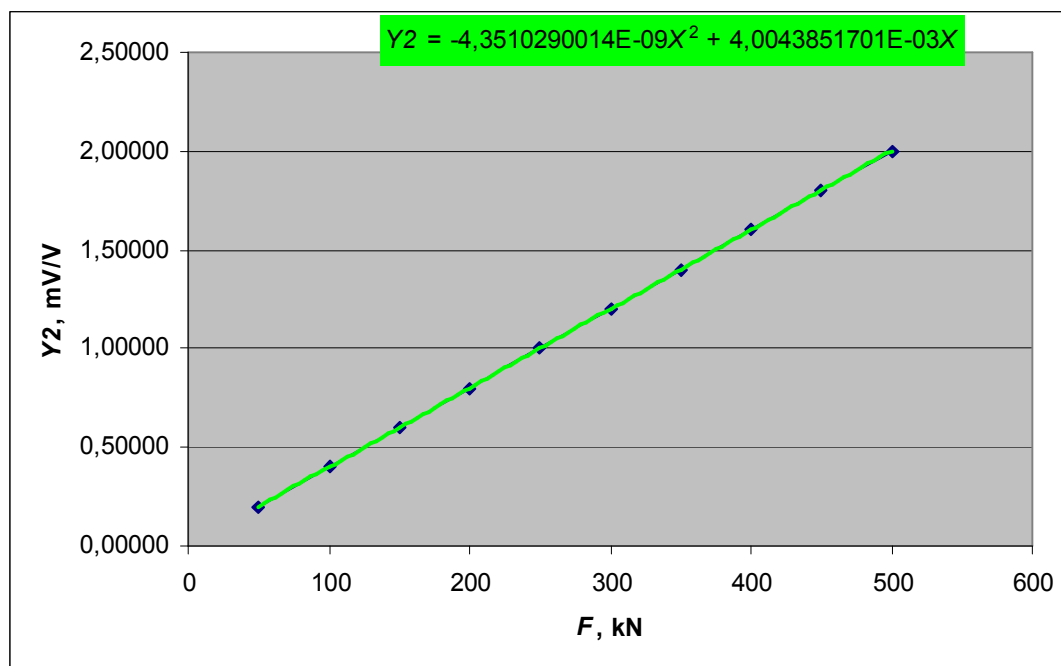
$$YI = A * X, \quad (4.1)$$

pri čemu je $A = 4,0026758373E-03$.



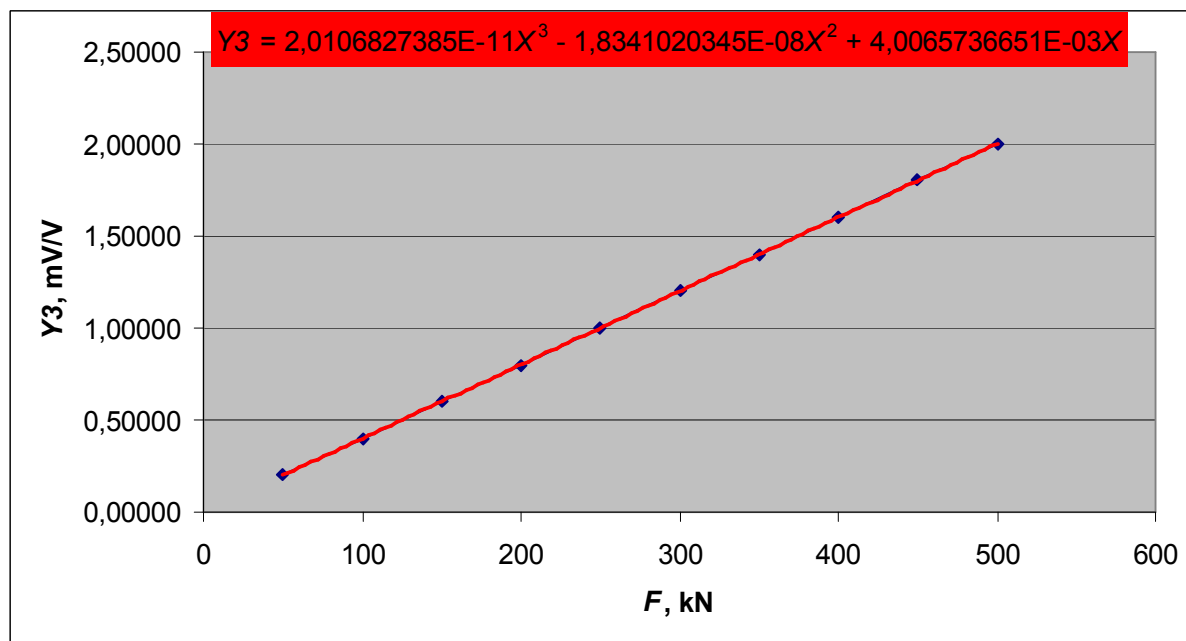
Slika 16: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN pravcem (polinomom 1. stupnja)

Polinomom 2. stupnja (slika 17) dobiva se složenija jednačba umjeravanja:
 $Y2 = A \cdot X^2 + B \cdot X,$ (4.2)
 $A = -4,3510290014E-09$
 $B = 4,0043851701E-03.$



Slika 17: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 2. stupnja

Jednačba umjeravanja oblika polinoma 3. stupnja (slika 18) za iste podatke je:
 $Y3 = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X,$ (4.3)
 $A = 2,0106827385E-11$
 $B = -1,8341020345E-08$
 $C = 4,0065736651E-03.$



Slika 18: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 3. stupnja

Moguće je odabrati još viši stupanj jednadžbe umjeravanja, npr. polinom 5. stupnja (slika 19) oblika:

$$Y5 = A \cdot X^5 + B \cdot X^4 + C \cdot X^3 + D \cdot X^2 + E \cdot X, \quad (4.4)$$

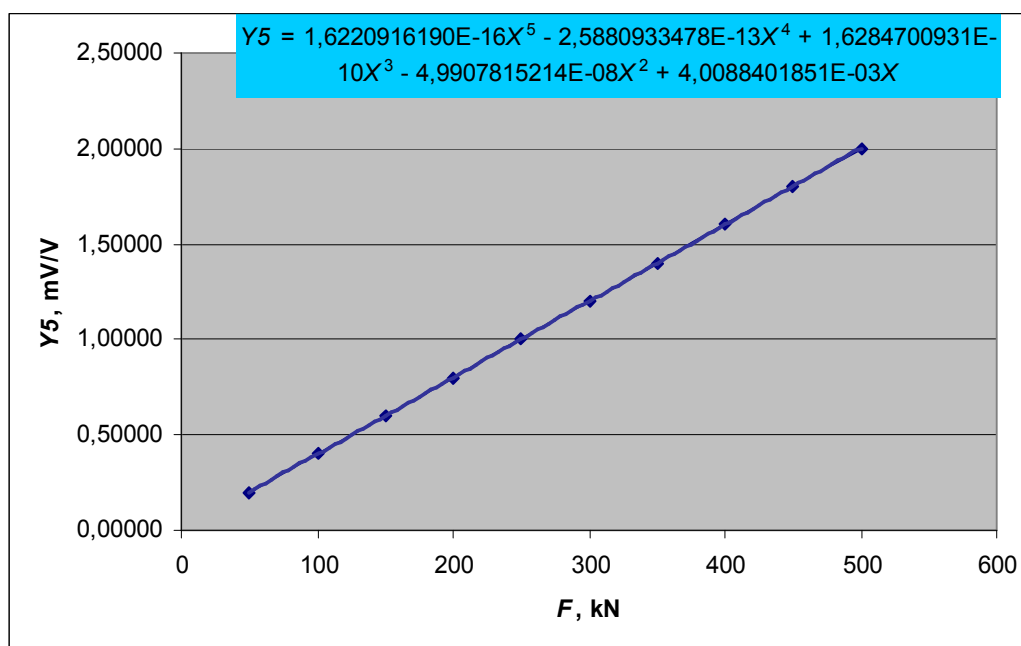
$$A = 1,622091619E-16$$

$$B = -2,5880933478E-13$$

$$C = 1,6284700931E-10$$

$$D = -4,9907815214E-08,$$

$$E = 4,0088401851E-03.$$



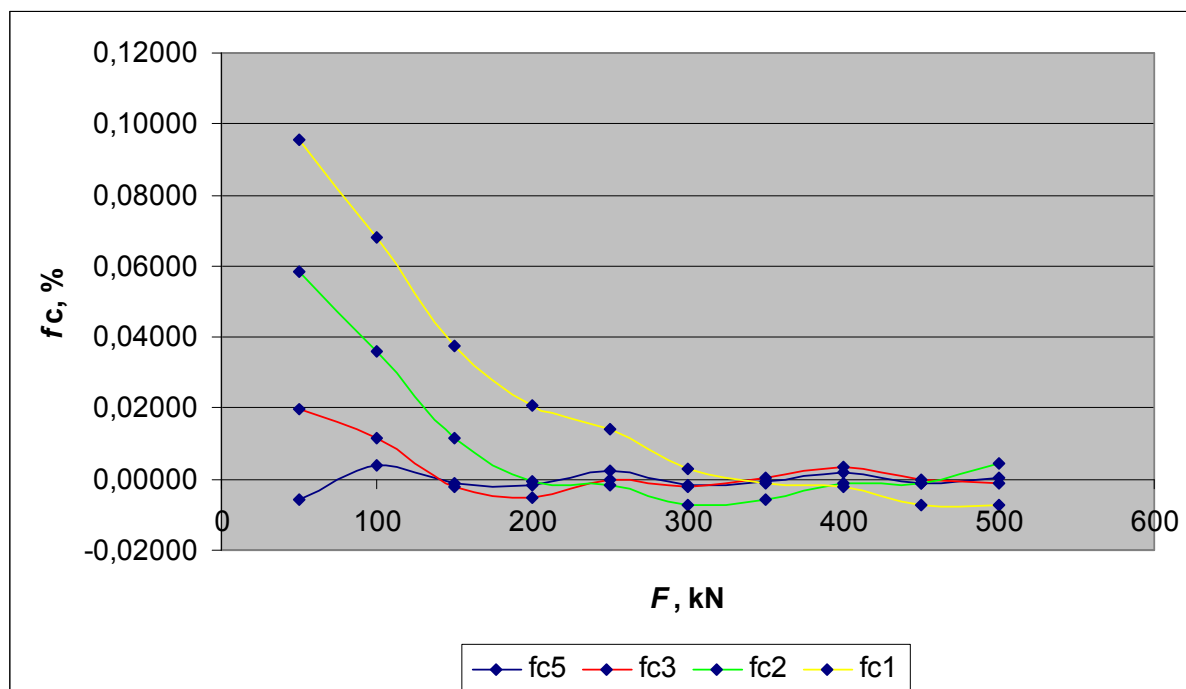
Slika 19: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 5. stupnja

Svakim ovim polinomom može se dobiti interpolirana vrijednosti za bilo koji iznos sile od 50 do 500 kN. U tablici 7 usporedno su prikazane vrijednosti interpolirane svakom od četiri dobivene jednadžbe (prema izrazima 4.1 do 4.4), za iste iznose sile kao kod umjeravanja i s pripadajućim srednjim vrijednostima očitavanja kod opterećenja pri različitim položaju (X_{sr-r}). Za svaki polinom i svaku interpoliranu vrijednost izračunato je i relativno interpolacijsko odstupanje fc prema izrazu 3.5 (fc_1 za pravac, fc_2 za polinom 2. stupnja itd.).

Tablica 7: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stupnja za prijenosni etalon Z4/500 kN

Sila, kN	X_{sr-r} , mV/V	$Y1$, mV/V	fc_1 , %	$Y2$, mV/V	fc_2 , %	$Y3$, mV/V	fc_3 , %	$Y5$, mV/V	fc_5 , %
50	0,20032	0,20013	0,09551	0,20021	0,05822	0,20029	0,01977	0,20034	-0,00553
100	0,40054	0,40027	0,06796	0,40040	0,03611	0,40049	0,01137	0,40052	0,00401
150	0,60063	0,60040	0,03778	0,60056	0,01138	0,60064	-0,00217	0,60063	-0,00097
200	0,80070	0,80054	0,02052	0,80070	-0,00044	0,80074	-0,00530	0,80071	-0,00160
250	1,00081	1,00067	0,01390	1,00082	-0,00163	1,00081	-0,00033	1,00078	0,00253
300	1,20084	1,20080	0,00287	1,20092	-0,00722	1,20086	-0,00225	1,20086	-0,00148
350	1,40092	1,40094	-0,00115	1,40100	-0,00581	1,40092	0,00031	1,40093	-0,00072
400	1,60104	1,60107	-0,00212	1,60106	-0,00134	1,60098	0,00341	1,60101	0,00174
450	1,80107	1,80120	-0,00727	1,80109	-0,00106	1,80108	-0,00018	1,80109	-0,00102
500	2,00120	2,00134	-0,00706	2,00110	0,00459	2,00121	-0,00091	2,00119	0,00021

Relativna interpolacijska odstupanja za sve polinome mogu se prikazati i grafički u ovisnosti o sili (slika 20).



Slika 20: Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/500 kN

Iz slike 20 može se vidjeti da je relativno interpolacijsko odstupanje za neki polinom to veće, što je pripadajuća sila manja. Također, pri manjim silama znatna je i razlika između interpolacijskih odstupanja različitih polinoma, a odstupanje je veće, što je stupanj polinoma niži. Kako je za klasu prijenosnih etalona 00 dozvoljeno relativno interpolacijsko odstupanje $\pm 0,025\%$, za interpolaciju rezultata mjerenja može se uzeti polinom 3. ili višeg stupnja. Polinomi 1. i 2. stupnja nisu povoljni za interpolaciju pri manjim silama jer daju preveliku interpolacijsku grešku za klasu 00. Razlika između interpolacijskih odstupanja polinoma 5. i 3. stupnja nije značajna, ali polinom 5. stupnja je znatno složeniji, pa se kao jednadžba umjeravanja za uzima polinom 3. stupnja:

$$Y3 = 2,0106827385 \cdot 10^{-11} X^3 - 1,8341020345 \cdot 10^{-8} X^2 + 4,0065736651 \cdot 10^{-3} X. \quad (4.3)$$

U tablici 8 prikazane su vrijednosti promjene izlaznog signala u mV/V dobivene interpolacijom polinomom 3. stupnja za sile u mjernom području od 50 do 500 kN s korakom od 5 kN.

Tablica 8: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4/500 kN

Sila, kN	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	5	10	15	20
50	0,20029	0,22031	0,24033	0,26036	0,28038
75	0,30040	0,32042	0,34044	0,36046	0,38048
100	0,40049	0,42051	0,44053	0,46054	0,48056
125	0,50057	0,52059	0,54060	0,56062	0,58063
150	0,60064	0,62065	0,64066	0,66068	0,68069
175	0,70070	0,72071	0,74072	0,76072	0,78073
200	0,80074	0,82075	0,84076	0,86077	0,88077
225	0,90078	0,92079	0,94079	0,96080	0,98081
250	1,00081	1,02082	1,04082	1,06083	1,08083
275	1,10084	1,12084	1,14085	1,16085	1,18086
300	1,20086	1,22087	1,24087	1,26088	1,28088
325	1,30089	1,32089	1,34090	1,36091	1,38091
350	1,40092	1,42092	1,44093	1,46093	1,48094
375	1,50095	1,52095	1,54096	1,56097	1,58097
400	1,60098	1,62099	1,64100	1,66101	1,68102
425	1,70102	1,72103	1,74104	1,76105	1,78107
450	1,80108	1,82109	1,84110	1,86111	1,88113
475	1,90114	1,92115	1,94117	1,96118	1,98120
500	2,00121	2,02123	2,04125	2,06127	2,08129

Iz jednadžbe umjeravanja 4.3 može se izraziti inverzna jednadžba koja daje mogućnost da se iz vrijednosti promjene u mV/V dobije odgovarajuća sila :

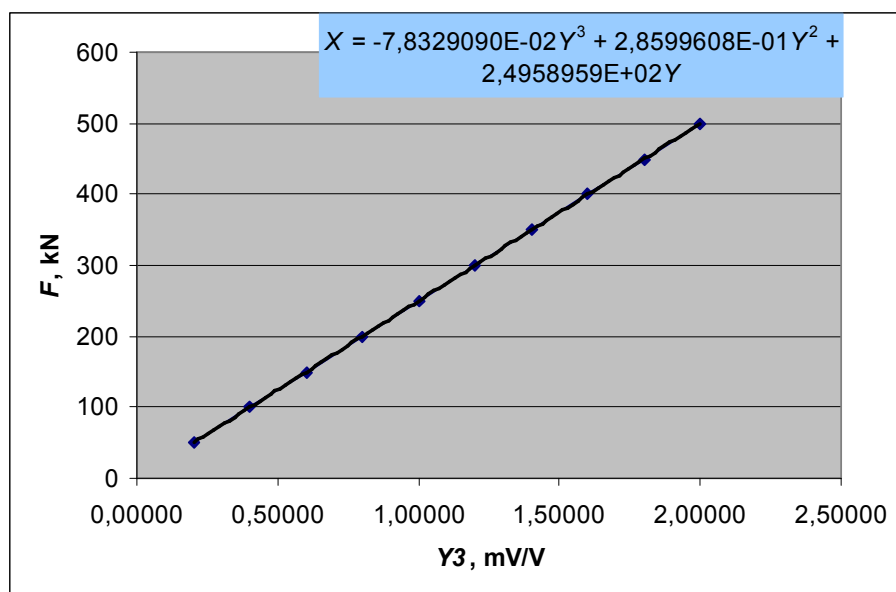
$$X = R \cdot Y^3 + S \cdot Y^2 + T \cdot Y, \quad (4.5)$$

$$R = -7,8329090E-02$$

$$S = 2,8599608E-01$$

$$T = 2,4958959E+02.$$

Odnos sile i izlazne promjene u inverznom obliku prikazana je slikom 21.



Slika 21: Inverzni prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/500 kN polinomom 3. stupnja

4.4.3. KRITERIJI OCJENJIVANJA

Da bi se umjeravani prijenosni etalon mogao klasificirati iz rezultata mjerenja izračunati su kriteriji za klasifikaciju. U tablici 9 prikazano je relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0) za mjerne nizove X_1 , X_2 , X_4' i X_6' , dobiveno prema izrazu 3.6.

Tablica 9: Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4/500 kN

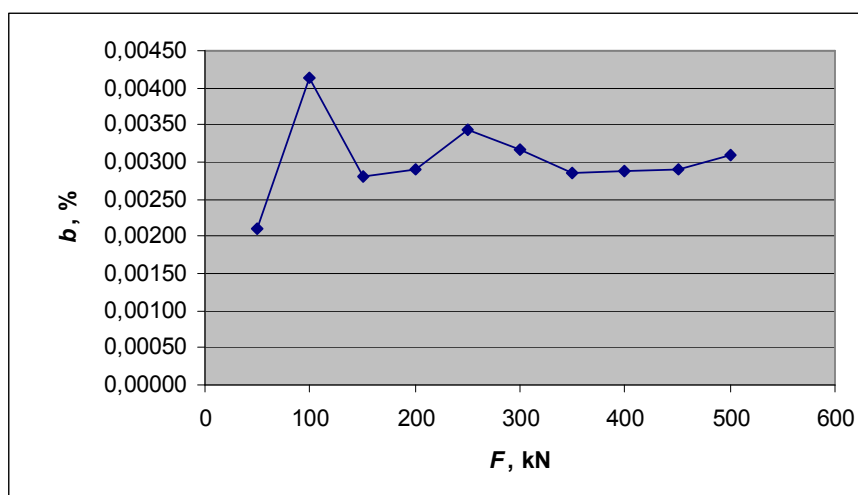
	Mjerni niz			
	X_1	X_2	X_4'	X_6'
Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0), %	-0,00400	-0,00350	-0,00200	-0,00150

U tablici 10 prikazani su iznosi ostalih kriterija: relativne greške obnovljivosti bez rotacije (b') prema izrazu 3.3, relativne greške ponovljivosti s rotacijom (b) prema izrazu 3.1, relativne greške histereze (v) prema izrazu 3.9 i relativnog interpolacijskog odstupanja (f_c) prema izrazu 3.5. Za svaki iznos sile od 50 do 500 kN s korakom od 50 kN dane su i srednje vrijednosti očitavanja (X_{sr-r} i X_{sr-wr}) prema izrazima 3.2 i 3.4.

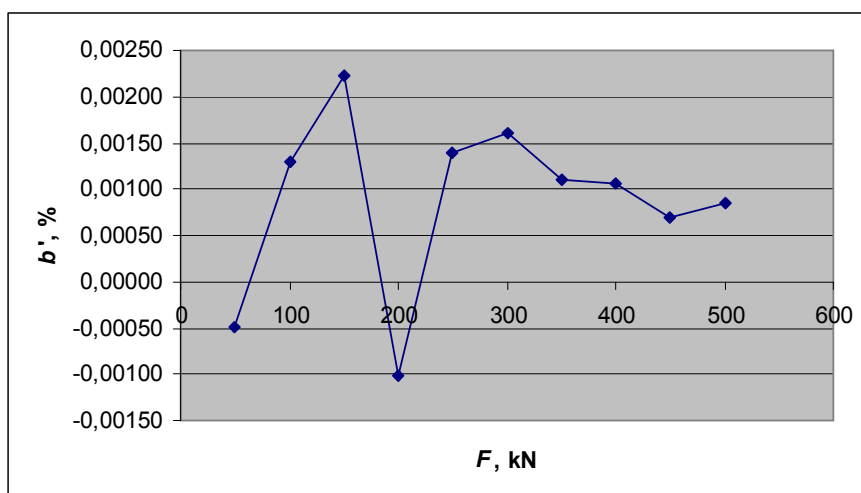
Tablica 10: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4/500 kN

Sila, kN	X_{sr-wr} , mV/V	X_{sr-r} , mV/V	b' , %	b , %	v , %	f_c , %
50	0,20033	0,20032	-0,00050	0,00210	-0,03934	0,01977
100	0,40054	0,40054	0,00130	0,00414	-0,04979	0,01137
150	0,60062	0,60063	0,00223	0,00280	-0,04257	-0,00217
200	0,80068	0,80070	-0,00102	0,00290	-0,03957	-0,00530
250	1,00080	1,00081	0,00140	0,00344	-0,03402	-0,00033
300	1,20083	1,20084	0,00162	0,00318	-0,02960	-0,00225
350	1,40091	1,40092	0,00110	0,00286	-0,02580	0,00031
400	1,60102	1,60104	0,00106	0,00287	-0,02098	0,00341
450	1,80105	1,80107	0,00069	0,00290	-0,01248	-0,00018
500	2,00118	2,00120	0,00085	0,00310		-0,00091

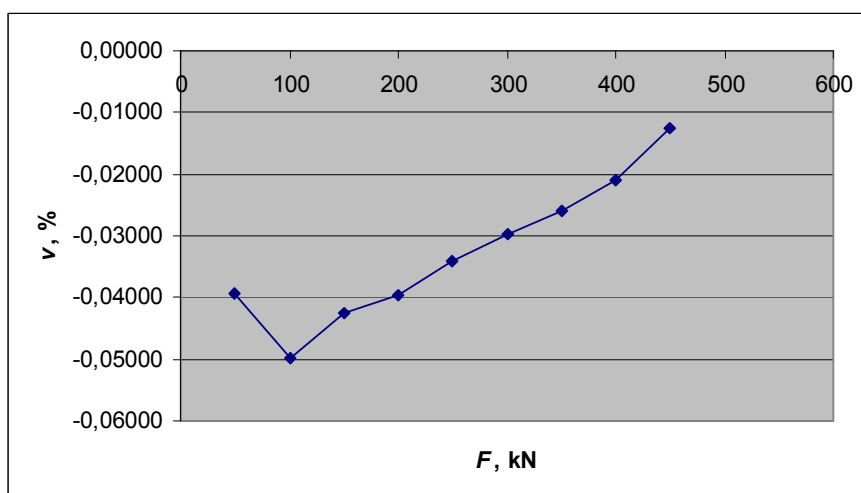
Iznosi izračunatih grešaka ovisno o iznosu sile prikazani su grafički na slikama 22, 23 i 24.



Slika 22: Relativna greška ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4/500 kN



Slika 23: Relativna greška obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4/500 kN



Slika 24: Relativna greška histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4/500 kN

Dok se za relativne greške ponovljivosti i obnovljivosti iz grafičkog prikaza ne može zaključiti o nekakvom trendu promjene s obzirom na promjenu sile, kod relativne greške histereze grafički prikaz ipak ukazuje na to, da se greška po apsolutnom iznosu smanjuje porastom sile. (Isto se može primjetiti i za etalone Z4/100 kN i Z4/200 kN za koje se svi podaci o umjeravanju nalaze u Prilogu I i Prilogu II).

4.5. ANALIZA REZULTATA UMJERAVANJA

Tablica 11 prikazuje kriterije ocjenjivanja potrebne za klasifikaciju prijenosnih etalona prema normi EN ISO 376. Vrijednosti tih kriterija izračunate su za sva tri umjeravana etalona, koji su na temelju istih svrstani u određenu klasu.

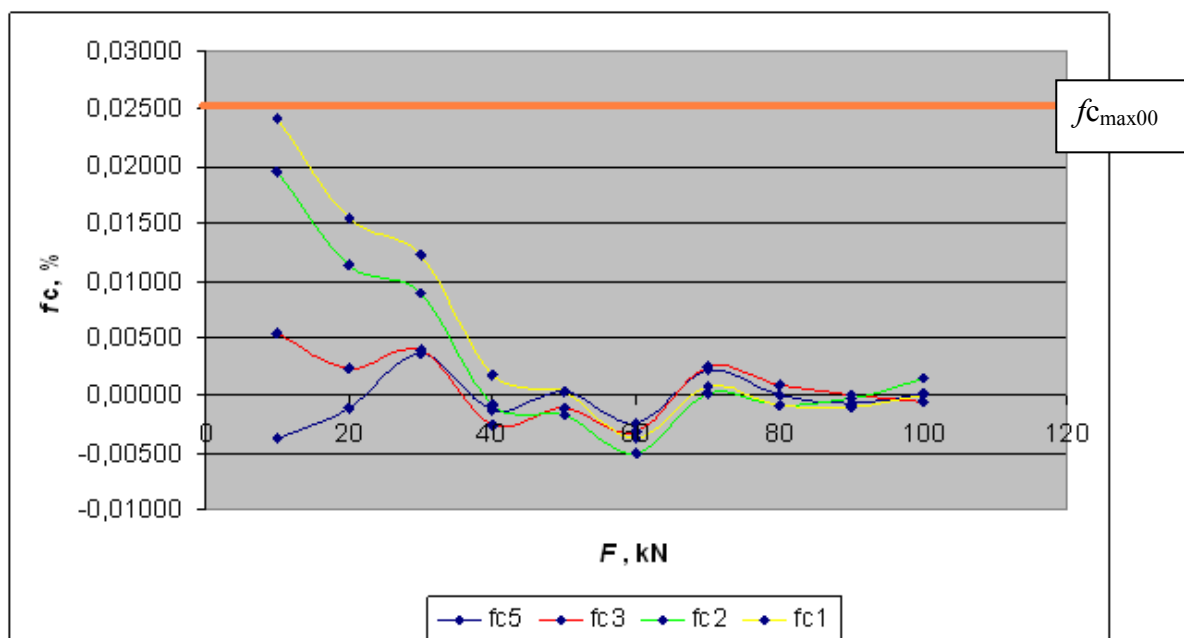
Tablica 11: Kriteriji ocjenjivanja i klasifikacija prijenosnih etalona Z4/100 kN, Z4/200 kN i Z4/500 kN

Prijenosni etalon	Sila, kN	b' , %	b , %	ν , %	f_o , %	f_c , %	Klasa
Z4/100 kN	10	-0,00545	0,00992	0,04094	0,00447	0,00542	00
	20	-0,01018	0,01416	0,01774		0,00233	00
	30	-0,00529	0,00993	0,00935		0,00391	00
	40	-0,00547	0,00882	0,00610		-0,00264	00
	50	-0,00566	0,01083	0,00382		-0,00118	00
	60	-0,00472	0,00936	0,00310		-0,00321	00
	70	-0,00497	0,00908	0,00209		0,00248	00
	80	-0,00379	0,00789	0,00065		0,00096	00
	90	-0,00530	0,01016	0,00030		0,00007	00
	100	-0,00502	0,01033			-0,00051	00
Z4/200 kN	20	-0,00393	0,00343	0,03714	0,00343	0,00898	00
	40	0,00171	0,00661	0,02715		-0,01775	00
	60	0,00375	0,00457	0,03899		0,00576	00
	80	0,00281	0,00367	0,03456		0,00274	00
	100	0,00255	0,00294	0,02496		0,00309	00
	120	0,00710	0,00645	0,02244		-0,00534	00
	140	0,00497	0,00343	0,01525		0,00157	00
	160	0,00447	0,00343	0,00799		0,00105	00
	180	0,00414	0,00387	0,00332		-0,00151	00
	200	0,00406	0,00372			0,00059	00
Z4/500 kN	50	-0,00050	0,00210	-0,03934	-0,00400	0,01977	00
	100	0,00130	0,00414	-0,04979		0,01137	00
	150	0,00223	0,00280	-0,04257		-0,00217	00
	200	-0,00102	0,00290	-0,03957		-0,00530	00
	250	0,00140	0,00344	-0,03402		-0,00033	00
	300	0,00162	0,00318	-0,02960		-0,00225	00
	350	0,00110	0,00286	-0,02580		0,00031	00
	400	0,00106	0,00287	-0,02098		0,00341	00
	450	0,00069	0,00290	-0,01248		-0,00018	00
	500	0,00085	0,00310			-0,00091	00

Iz priloženih rezultata vidi se da prema normi EN ISO 376 sva tri prijenosna etalona pripadaju klasi 00. Sve vrijednosti svih izračunatih kriterija nalaze se u intervalu dozvoljenih vrijednosti za ovu klasu (prema tablici 3). Nema čak niti vrijednosti koje bi bile vrlo blizu granice dozvoljenih iznosa za klasu 00. Dakle:

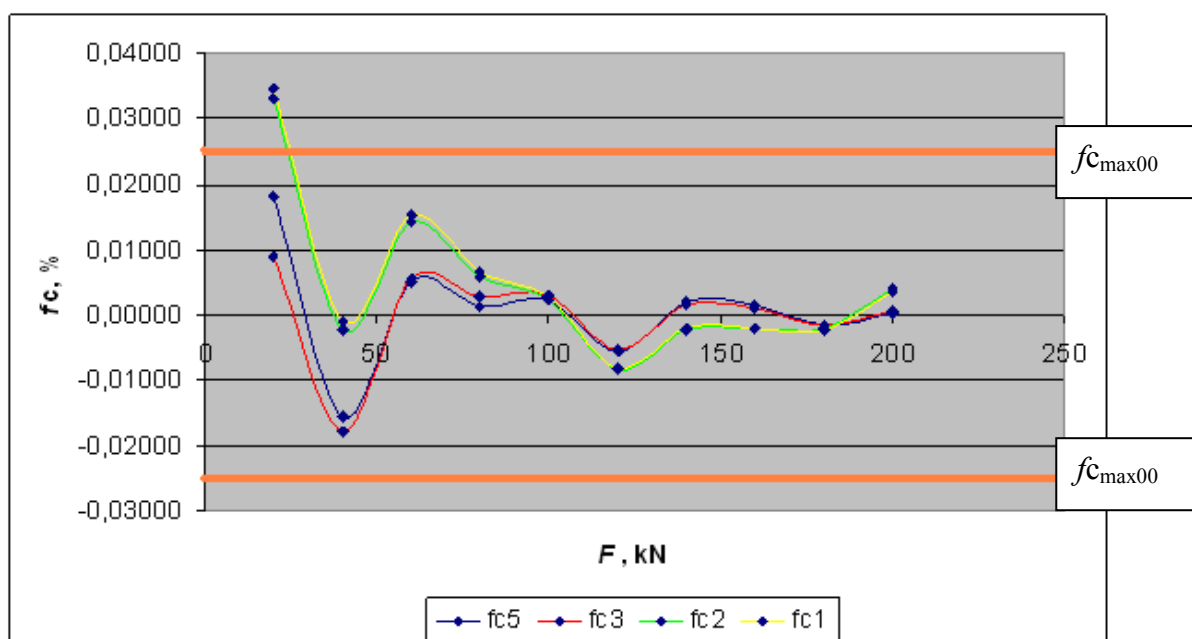
- prijenosni etalon Z4/100 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 10 do 100 kN
- prijenosni etalon Z4/200 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 20 do 200 kN
- prijenosni etalon Z4/500 kN zadovoljava kriterije klase 00 u mjernom području od 50 do 500 kN.

Slike 25, 26 i 27 prikazuju relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili, pojedinog umjeravanog etalona, za sve polinome primjenjene pri određivanju interpolacijskih krivulja. U dijagrame je ucrtana i granična vrijednost relativnog interpolacijskog odstupanja za određenu klasu.



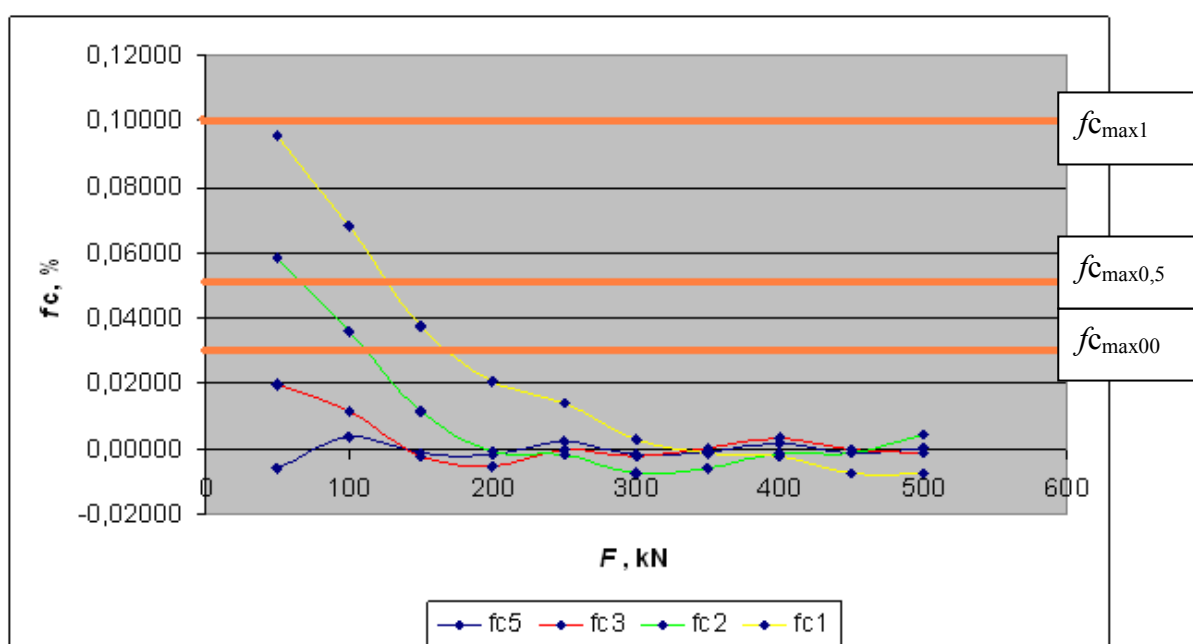
Slika 25: Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/100 kN

Prijenosni etalon Z4/100kN prema iznosu relativnog interpolacijskog odstupanja upada u klasu 00, bez obzira na stupanj polinoma interpolacije.



Slika 26: Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/200 kN

Prijenosni etalon Z4/200kN upada u klasu 00 za krivulje interpolacije 3. i 5. stupnja. Za pravac i krivulju interpolacije 2. stupnja, zbog višeg relativnog interpolacijskog odstupanja pri manjim silama, upada u nižu klasu 0,5.



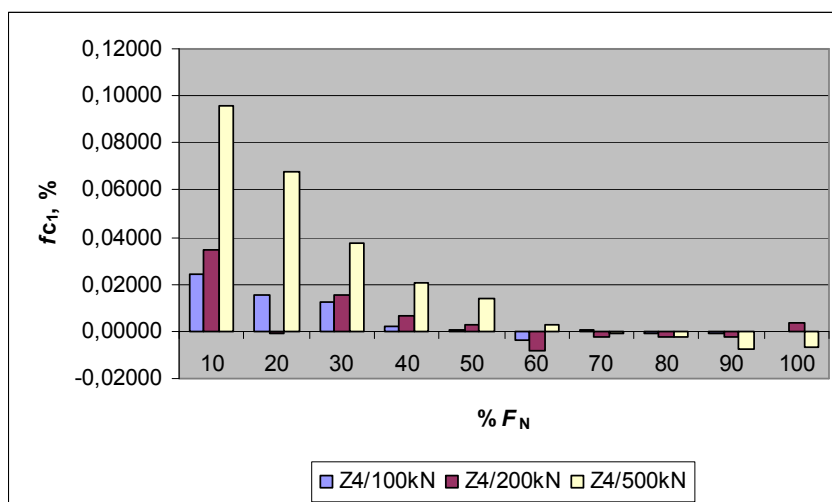
Slika 27: Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/500 kN

Prijenosni etalon Z4/500kN za krivulje interpolacije 3. i 5. stupnja upada u najvišu klasu 00. Za krivulju interpolacije 2. stupnja te za pravac ovaj etalon upada čak u klasu 1, zbog visokih iznosa interpolacijskog odstupanja pri manjim silama.

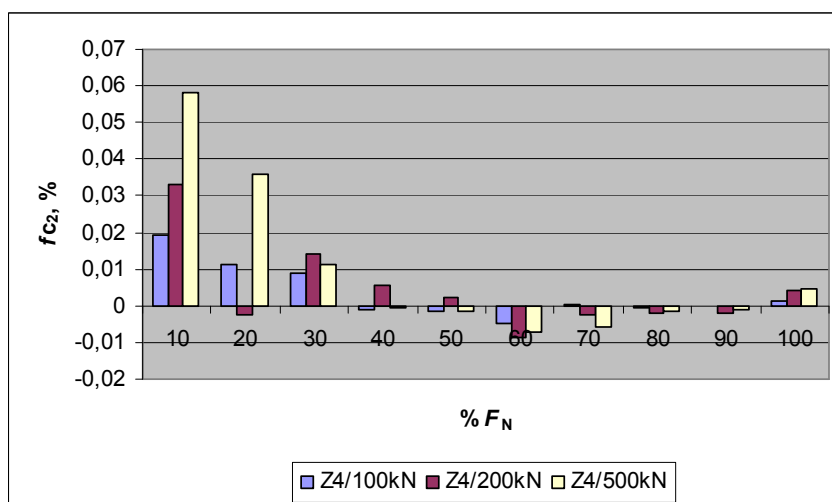
Općenito, iz usporedbi relativnih interpolacijskih odstupanja za različite krivulje interpolacije, vidi se da je odstupanje (po apsolutnoj vrijednosti) za sva tri etalona u pravilu veće pri manjim silama. Također, ono je veće kod polinoma nižih stupnjeva, a najveće je kod linearizacije.

Polinomi 1. i 2. stupnja stoga nisu povoljni za interpolaciju jer pri manjim silama daju preveliku interpolacijsku grešku za klasu 00. Iznimka bi mogao biti prijenosni etalon Z4/100kN, no i kod njega se relativno interpolacijsko odstupanje približava graničnoj vrijednosti za klasu 00 pri manjim silama. Polinomi 5. stupnja zadovoljavaju kriterij za klasu 00, ali su složeni, a razlika između odstupanja polinoma 3. i 5. stupnja nije značajna, pa se kao jednadžbe umjeravanja za ove etalone uzimaju polinomi 3. stupnja. Upravo su relativna interpolacijska odstupanja za polinom 3. stupnja uzeta kao kriterij za klasifikaciju prijenosnih etalona u tablici 11.

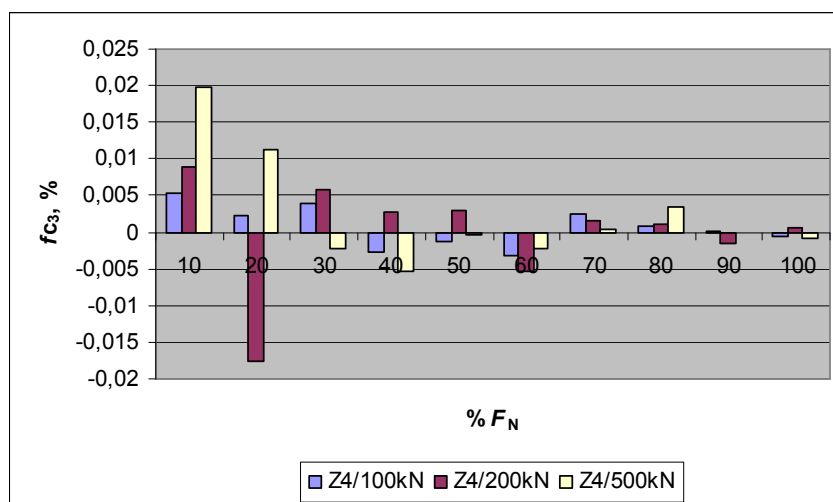
Za polinom svakog stupnja mogu se relativna interpolacijska odstupanja usporedno prikazati za sva tri etalona, pri čemu odstupanje ovisi o postotku nazivne sile određenog etalona. Za korištene polinome odstupanja su usporedno prikazana na slikama 25, 26, 27 i 28.



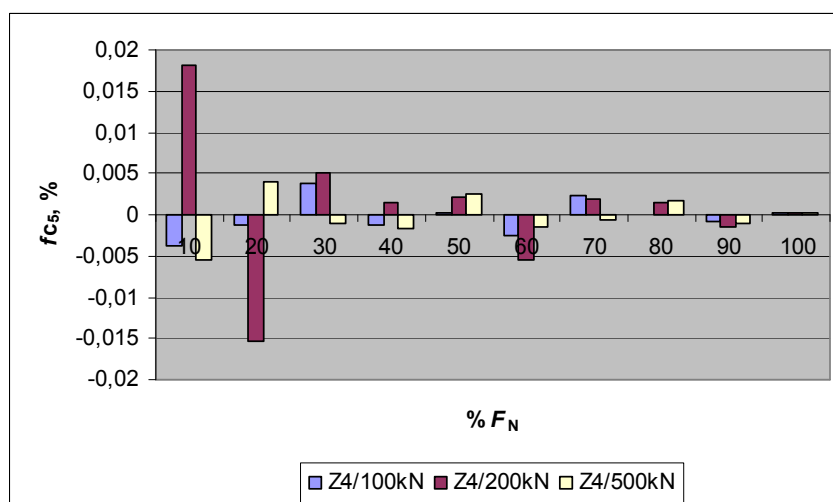
Slika 28: Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za linearizaciju (polinom 1. stupnja)



Slika 29: Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za polinom 2. stupnja



Slika 30: Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za polinom 3. stupnja



Slika 31: Usporedba relativnog interpolacijskog odstupanja za polinom 5. stupnja

Kad bi se etaloni uspoređivali međusobno, etalon najmanje nazivne sile Z4/100kN, u većini mjernih točaka ima najmanje interpolacijsko odstupanje, a međusobno se odstupanja tog etalona za određeni stupanj polinoma najmanje razlikuju. Etalon Z4/100kN iz ovih rezultata upada u klasu 00 ili je na granici te klase, gotovo bez obzira na iznos sile ili stupanj polinoma interpolacije.

Za razliku od toga, kod etalona Z4/200kN i Z4/500kN pri nižim silama, sve do 30% nazivne sile, vidljiva su veća interpolacijska odstupanja, pogotovo za polinome nižeg stupnja. Odstupanja su uglavnom veća kod etalona Z4/500kN, osim u slučaju interpolacije polinomom 5. stupnja.

5. ZAKLJUČAK

Iz obrađenih rezultata mjerenja i provedene analize rezultata, mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- **Za krivulje interpolacije:**
 - Polinomi 1. i 2. stupnja donose najveća relativna interpolacijska odstupanja te zbog toga nisu pogodni za krivulje interpolacije, jer izbacuju prijenosne etalone iz više klase u nižu.
 - Što je viši stupanj polinoma, to je interpolacijsko odstupanje manje pa su polinomi 3. i višeg stupnja pogodni za krivulje interpolacije.
 - Što je viši stupanj polinoma, složenost jednadžbe umjeravanja (tj. krivulje interpolacije) je veća pa se u ovom slučaju optimalnim pokazao polinom 3. stupnja te je on uzet kao jednadžba umjeravanja za sve umjeravane etalone.
- **O kriterijima klasifikacije umjerenih etalona:**
 - Relativno interpolacijsko odstupanje i relativna greška histereze generalno se smanjuju s porastom sile.
 - Za greške ponovljivosti i obnovljivosti na temelju dobivenih rezultata ne može se govoriti o trendu bilo porasta, bilo pada.
- **O klasi umjerenih etalona:**
 - prijenosni etalon Z4/100 kN pripada klasi 00 u mjernom području od 10 do 100 kN,
 - prijenosni etalon Z4/200 kN pripada klasi 00 u mjernom području od 20 do 200 kN,
 - prijenosni etalon Z4/500 kN pripada klasi 00 u mjernom području od 50 do 500 kN.

LITERATURA

- [1] Guide to the Measurement of Force, The Institute of Measurement and Control, 1998.
- [2] O. Muftić: Mehanika I (Statika), Tehnička knjiga, Zagreb, 1983.
- [3] www.ume.tubitak.gov.tr
- [4] S. Mahović: Teorija i tehnika mjerenja, podloge za predavanja, FSB, ak.god. 2006/2007.
- [5] Ž. Alar: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, magistarski rad, Zagreb, 2001.
- [6] Ž. Alar, M. Franz, T. Aleksandrov: Mjerna sposobnost referentnog etalona sile instaliranog u LIMS-u, Matrib '06
- [7] www.ptb.de
- [8] www.mhforce.com
- [9] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2004.
- [10] www.fsb.hr
- [11] EAL-G22: Uncertainty of Calibration Results in Force Measurements, European co – operation for Accreditation, 1996.
- [12] M. Franz: Mehanička svojstva materijala, FSB, Zagreb, 1998.
- [13] www.load-cells-inc.com

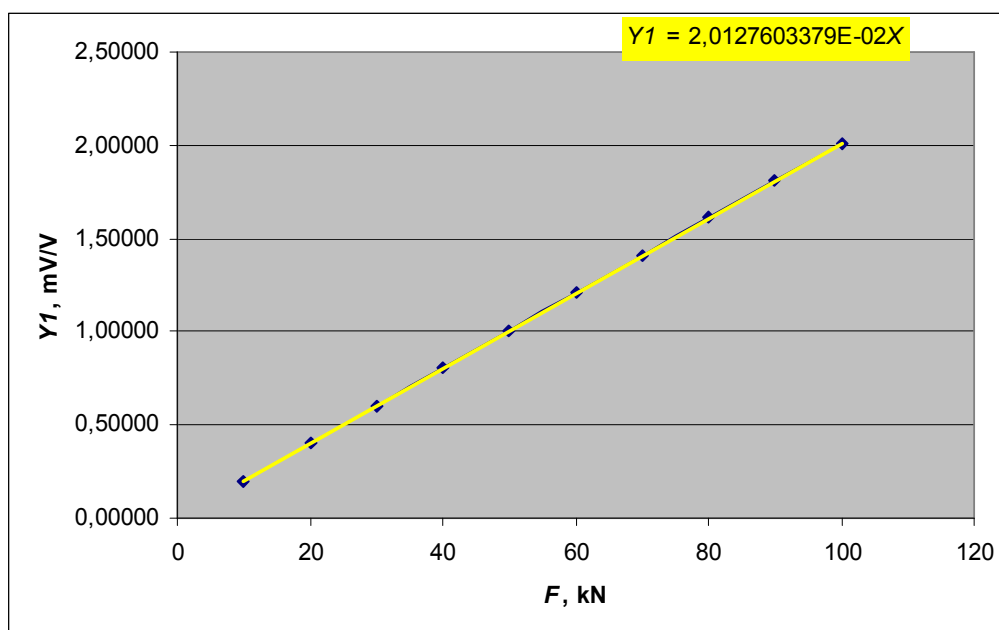
PRILOG I: REZULTATI UMJERAVANJA PRIJENOSNOG ETALONA Z4/100kN

Tablica 12: Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4/100 kN

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	2,01286	2,01280	2,01282
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,00002	0,00000	0,00005
Relativno odstupanje nul vrijednosti kod predopterećenja, %	0,00099	0,00000	0,00248

Tablica 13: Rezultati umjeravanja etalona Z4/100kN

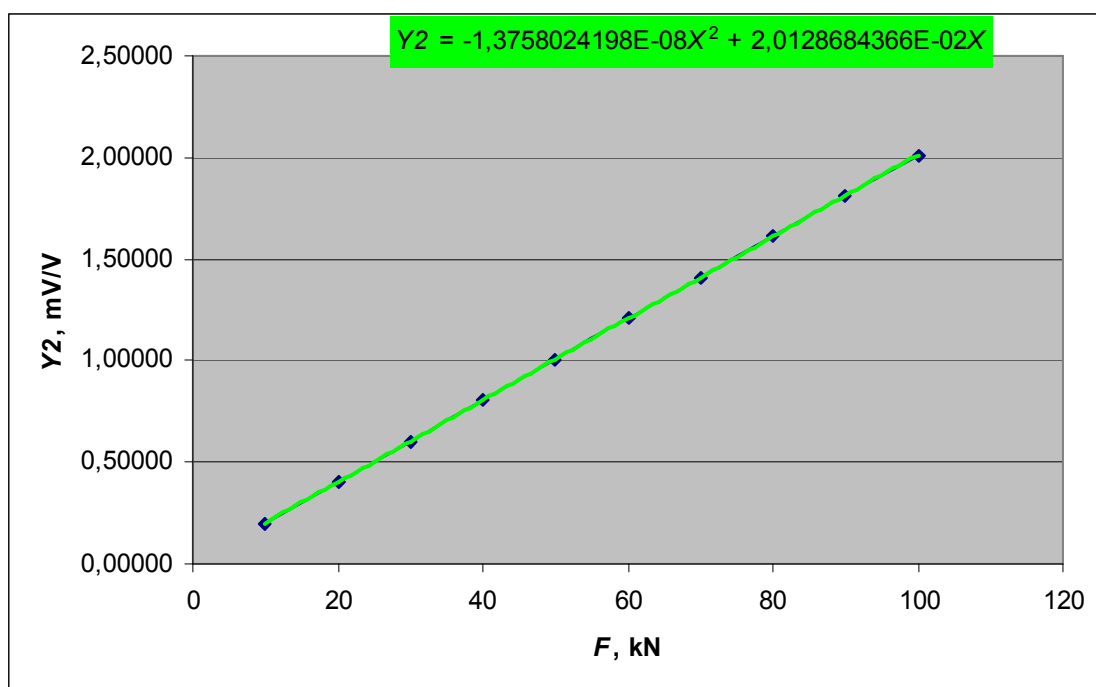
Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X ₁ , mV/V	X ₂ , mV/V	X ₃ , mV/V	X ₄ ', mV/V	X ₅ , mV/V	X ₆ ', mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00006	0,00000	0,00009
10	0,20133	0,20132	0,20133	0,20137	0,20131	0,20143
20	0,40264	0,40260	0,40263	0,40265	0,40258	0,40270
30	0,60392	0,60389	0,60392	0,60393	0,60386	0,60396
40	0,80514	0,80510	0,80514	0,80514	0,80507	0,80517
50	1,00641	1,00636	1,00642	1,00640	1,00631	1,00642
60	1,20766	1,20760	1,20764	1,20763	1,20754	1,20762
70	1,40900	1,40893	1,40896	1,40897	1,40887	1,40892
80	1,61025	1,61019	1,61021	1,61022	1,61012	1,61014
90	1,81155	1,81145	1,81149	1,81146	1,81136	1,81140
100	2,01286	2,01276	2,01277	2,01277	2,01266	2,01266
0	0,00003	0,00005				



Slika 32: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN pravcem (polinomom 1. stupnja):

$$Y1 = A * X,$$

$$A = 2,0127603379E-02$$

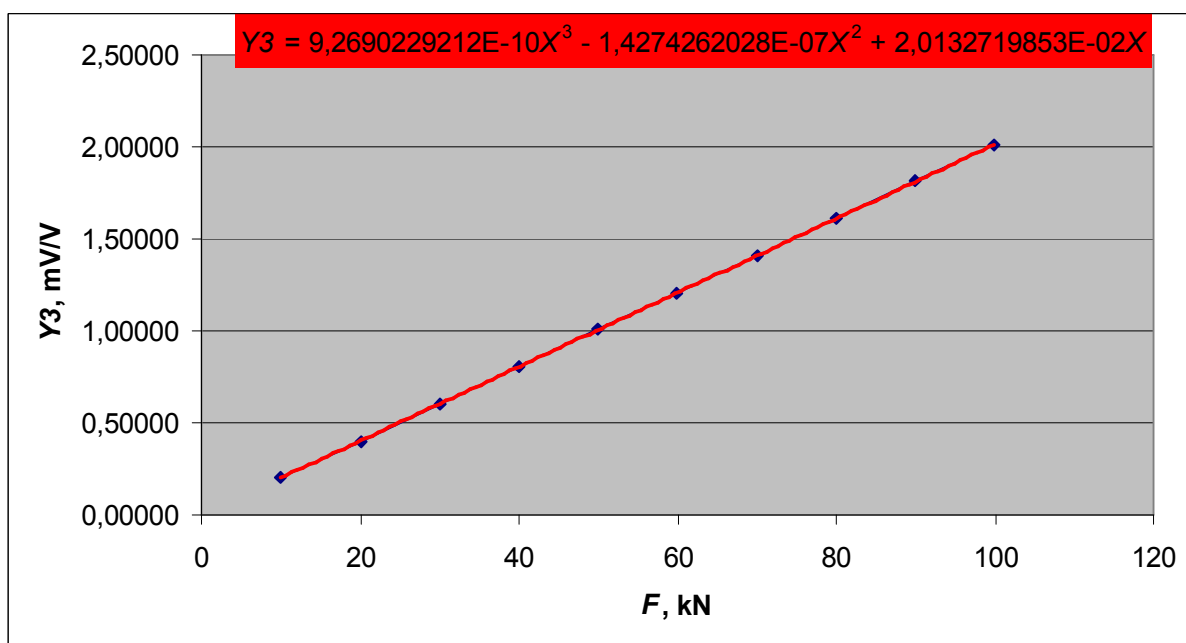


Slika 33: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 2. stupnja:

$$Y2 = A \cdot X^2 + B \cdot X,$$

$$A = -1,3758024198E-08$$

$$B = 2,0128684366E-02$$



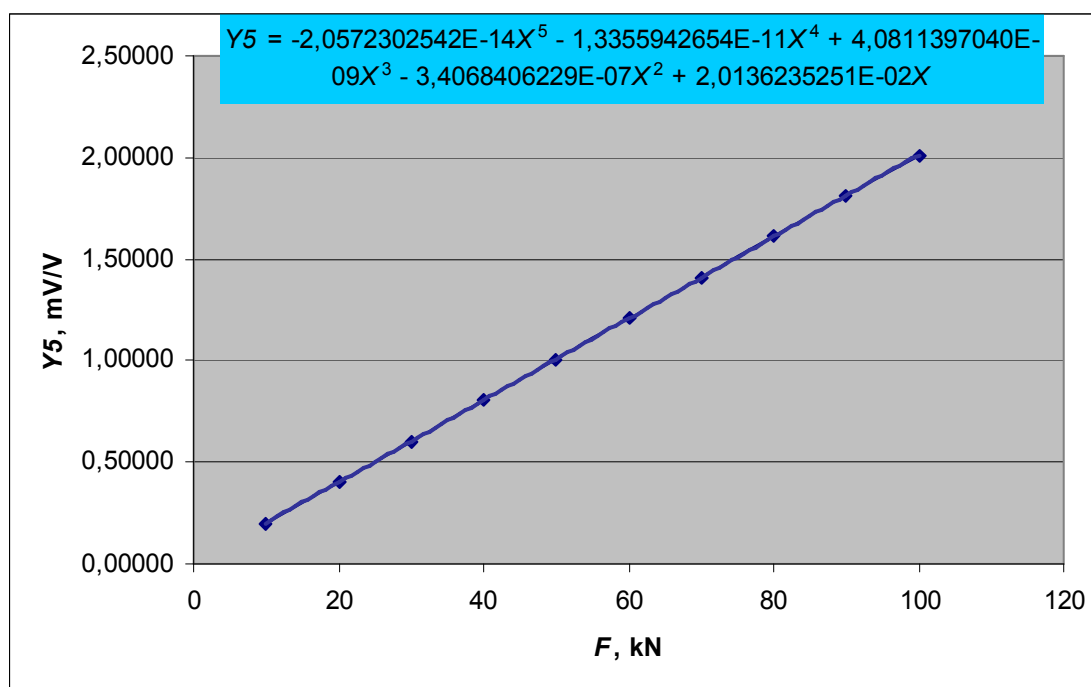
Slika 34: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 3. stupnja:

$$Y3 = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X,$$

$$A = 9,2690229212E-10$$

$$B = -1,4274262028E-07$$

$$C = 2,0132719853E-02$$



Slika 35: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 5. stupnja:

$$Y5 = A \cdot X^5 + B \cdot X^4 + C \cdot X^3 + D \cdot X^2 + E \cdot X,$$

$$A = -2,0572302542E-14$$

$$B = -1,3355942654E-11$$

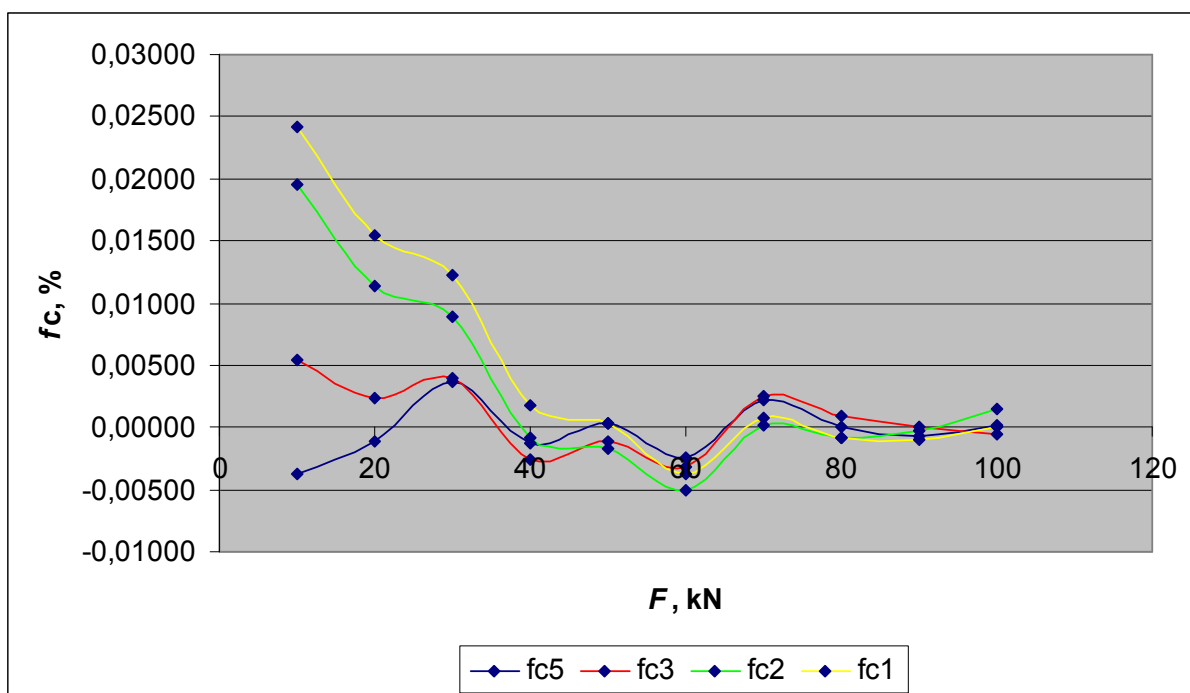
$$C = 4,0811397040E-09$$

$$D = -3,4068406229E-07$$

$$E = 2,0136235251E-02$$

Tablica 14: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stupnja za prijenosni etalon Z4/100 kN

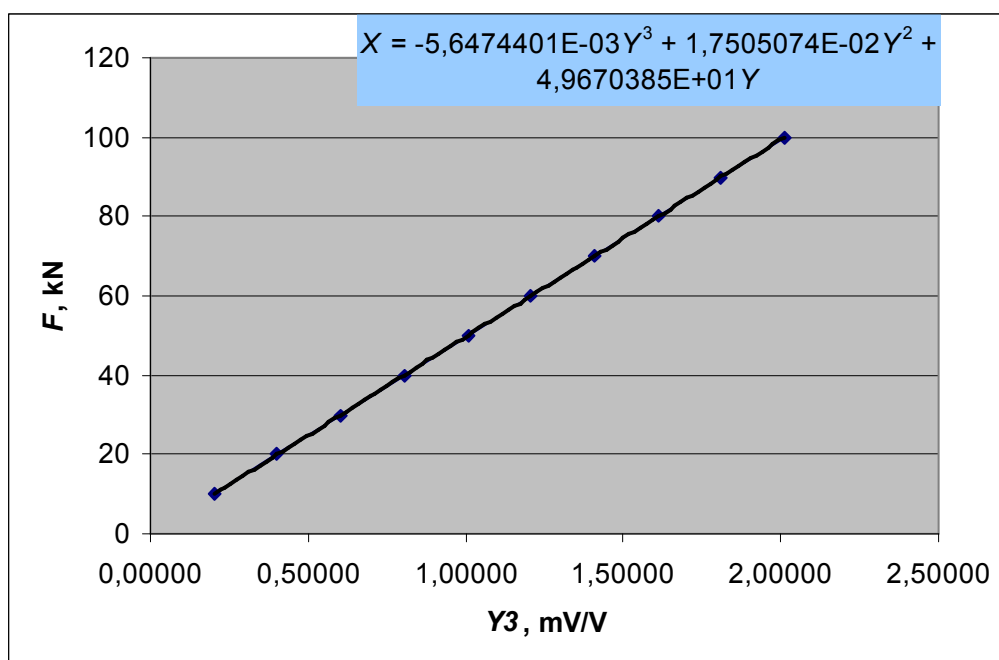
Sila, kN	X_{sr-r} , mV/V	$Y1$, mV/V	fc_1 ,%	$Y2$, mV/V	fc_2 ,%	$Y3$, mV/V	fc_3 ,%	$Y5$, mV/V	fc_5 ,%
10	0,20132	0,20128	0,02421	0,20129	0,01952	0,20131	0,00542	0,20133	-0,00371
20	0,40261	0,40255	0,01541	0,40257	0,01141	0,40260	0,00233	0,40262	-0,00118
30	0,60390	0,60383	0,01220	0,60385	0,00888	0,60388	0,00391	0,60388	0,00372
40	0,80512	0,80510	0,00178	0,80513	-0,00086	0,80514	-0,00264	0,80513	-0,00134
50	1,00638	1,00638	0,00029	1,00640	-0,00166	1,00639	-0,00118	1,00638	0,00028
60	1,20761	1,20766	-0,00376	1,20767	-0,00503	1,20765	-0,00321	1,20764	-0,00243
70	1,40894	1,40893	0,00082	1,40894	0,00023	1,40891	0,00248	1,40891	0,00228
80	1,61019	1,61021	-0,00088	1,61021	-0,00078	1,61018	0,00096	1,61019	0,00004
90	1,81147	1,81148	-0,00104	1,81147	-0,00026	1,81146	0,00007	1,81148	-0,00075
100	2,01276	2,01276	0,00004	2,01273	0,00151	2,01277	-0,00051	2,01276	0,00023



Slika 36: Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/100 kN

Tablica 15: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4/100 kN

Sila, kN	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	1	2	3	4
10	0,20131	0,22144	0,24157	0,26170	0,28183
15	0,30196	0,32209	0,34222	0,36235	0,38248
20	0,40260	0,42273	0,44286	0,46299	0,48312
25	0,50324	0,52337	0,54350	0,56362	0,58375
30	0,60388	0,62400	0,64413	0,66426	0,68438
35	0,70451	0,72464	0,74476	0,76489	0,78501
40	0,80514	0,82527	0,84539	0,86552	0,88564
45	0,90577	0,92589	0,94602	0,96614	0,98627
50	1,00639	1,02652	1,04665	1,06677	1,08690
55	1,10702	1,12715	1,14727	1,16740	1,18752
60	1,20765	1,22778	1,24790	1,26803	1,28815
65	1,30828	1,32840	1,34853	1,36866	1,38878
70	1,40891	1,42904	1,44916	1,46929	1,48942
75	1,50954	1,52967	1,54980	1,56992	1,59005
80	1,61018	1,63031	1,65043	1,67056	1,69069
85	1,71082	1,73095	1,75108	1,77121	1,79133
90	1,81146	1,83159	1,85172	1,87185	1,89198
95	1,91211	1,93225	1,95238	1,97251	1,99264
100	2,01277	2,03290	2,05304	2,07317	2,09330



Slika 37: Inverzni prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/100 kN polinomom 3. stupnja:

$$X = R \cdot Y^3 + S \cdot Y^2 + T \cdot Y,$$

$$R = -5,6474401E-03$$

$$S = 1,7505074E-02$$

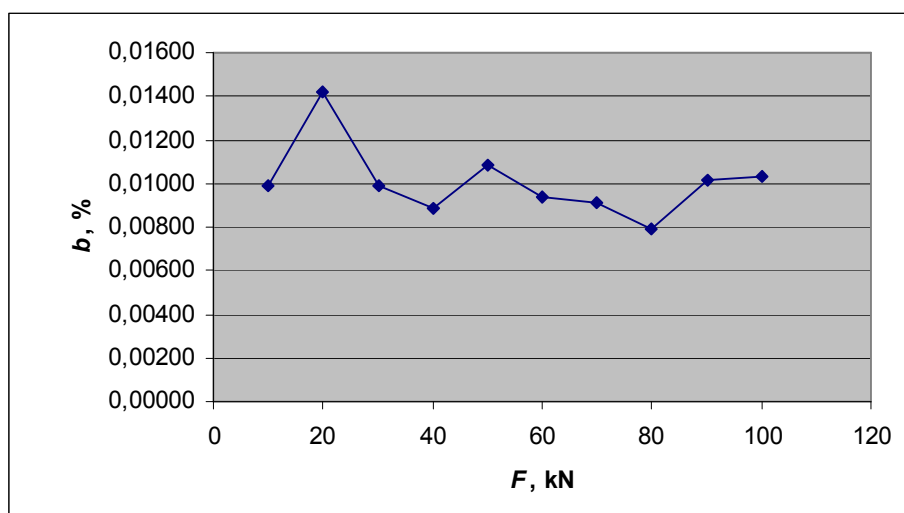
$$T = 4,9670385E+01.$$

Tablica 16: Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4/100 kN

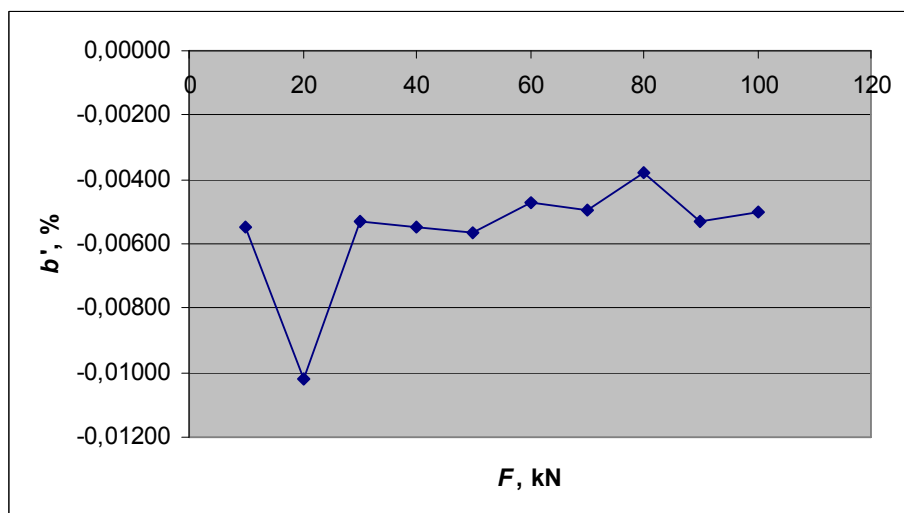
	Mjerni niz			
	X_1	X_2	X_4'	X_6'
Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0), %	0,00149	0,00248	0,00298	0,00447

Tablica 17: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4/100 kN

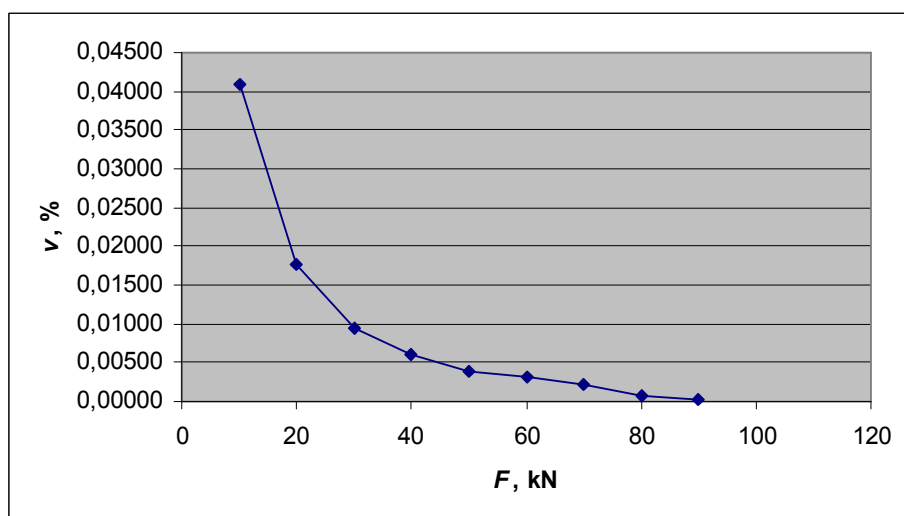
Sila, kN	X_{sr-wr} , mV/V	X_{sr-r} , mV/V	b' , %	b , %	v , %	f_c , %
10	0,20133	0,20132	-0,00545	0,00992	0,04094	0,00542
20	0,40262	0,40261	-0,01018	0,01416	0,01774	0,00233
30	0,60391	0,60390	-0,00529	0,00993	0,00935	0,00391
40	0,80512	0,80512	-0,00547	0,00882	0,00610	-0,00264
50	1,00638	1,00638	-0,00566	0,01083	0,00382	-0,00118
60	1,20763	1,20761	-0,00472	0,00936	0,00310	-0,00321
70	1,40896	1,40894	-0,00497	0,00908	0,00209	0,00248
80	1,61022	1,61019	-0,00379	0,00789	0,00065	0,00096
90	1,81150	1,81147	-0,00530	0,01016	0,00030	0,00007
100	2,01281	2,01276	-0,00502	0,01033		-0,00051



Slika 38: Relativna greška ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4/100 kN



Slika 39: Relativna greška obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4/100 kN



Slika 40: Relativna greška histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4/100 kN

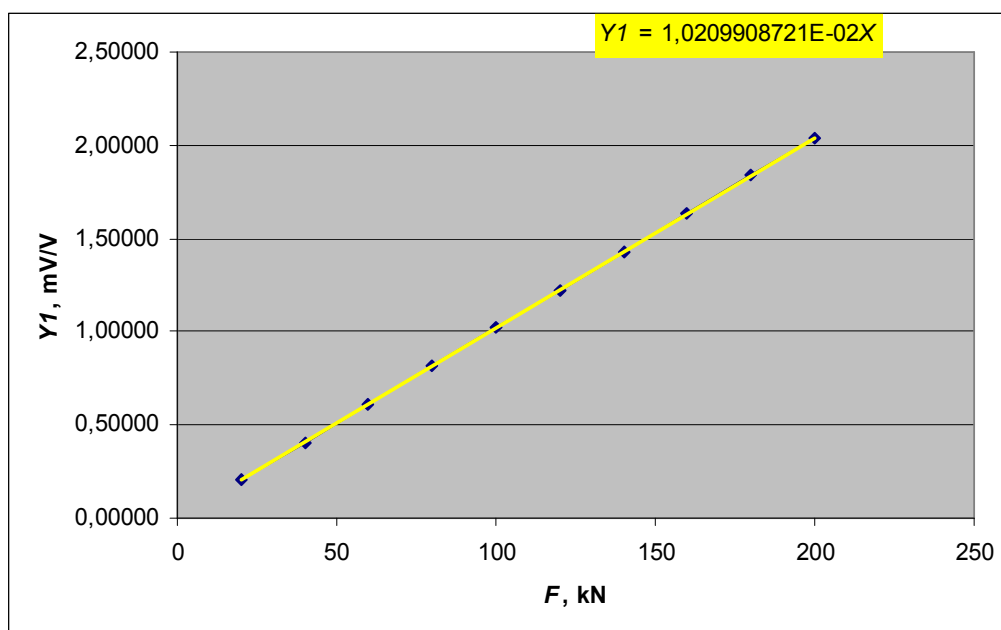
PRILOG II: REZULTATI UMJERAVANJA PRIJENOSNOG ETALONA Z4/200kN

Tablica 18: Izmjerene vrijednosti i relativna odstupanja nul vrijednosti kod predopterećenja za prijenosni etalon Z4/200 kN

	0°	120°	240°
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	2,04160	2,04181	2,04179
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	-0,00006	0,00002	0,00001
Relativno odstupanje nul vrijednosti kod predopterećenja, %	-0,00294	0,00098	0,00049

Tablica 19: Rezultati umjeravanja etalona Z4/200kN

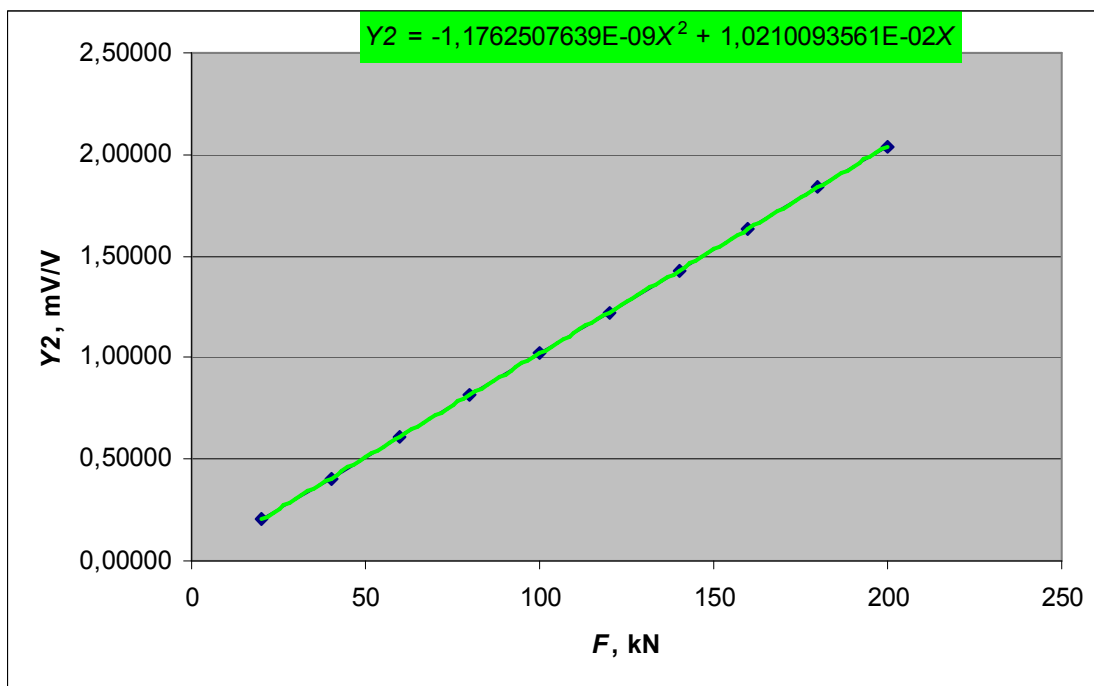
Sila, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaj			
	X_1 , mV/V	X_2 , mV/V	X_3 , mV/V	X_4' , mV/V	X_5 , mV/V	X_6' , mV/V
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,00007	0,00000	0,00007
20	0,20427	0,20426	0,20427	0,20433	0,20427	0,20436
40	0,40839	0,40839	0,40841	0,40849	0,40838	0,40852
60	0,61268	0,61270	0,61270	0,61293	0,61269	0,61294
80	0,81683	0,81685	0,81686	0,81713	0,81685	0,81715
100	1,02100	1,02103	1,02103	1,02128	1,02102	1,02129
120	1,22504	1,22513	1,22512	1,22540	1,22511	1,22538
140	1,42933	1,42940	1,42938	1,42961	1,42937	1,42957
160	1,63352	1,63359	1,63358	1,63372	1,63356	1,63368
180	1,83771	1,83778	1,83778	1,83784	1,83774	1,83780
200	2,04202	2,04210	2,04210	2,04210	2,04205	2,04205
0	0,00006	0,00004				



Slika 41: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN pravcem (polinomom 1. stupnja):

$$YI = A * X,$$

$$A = 1,0209908721E-02$$

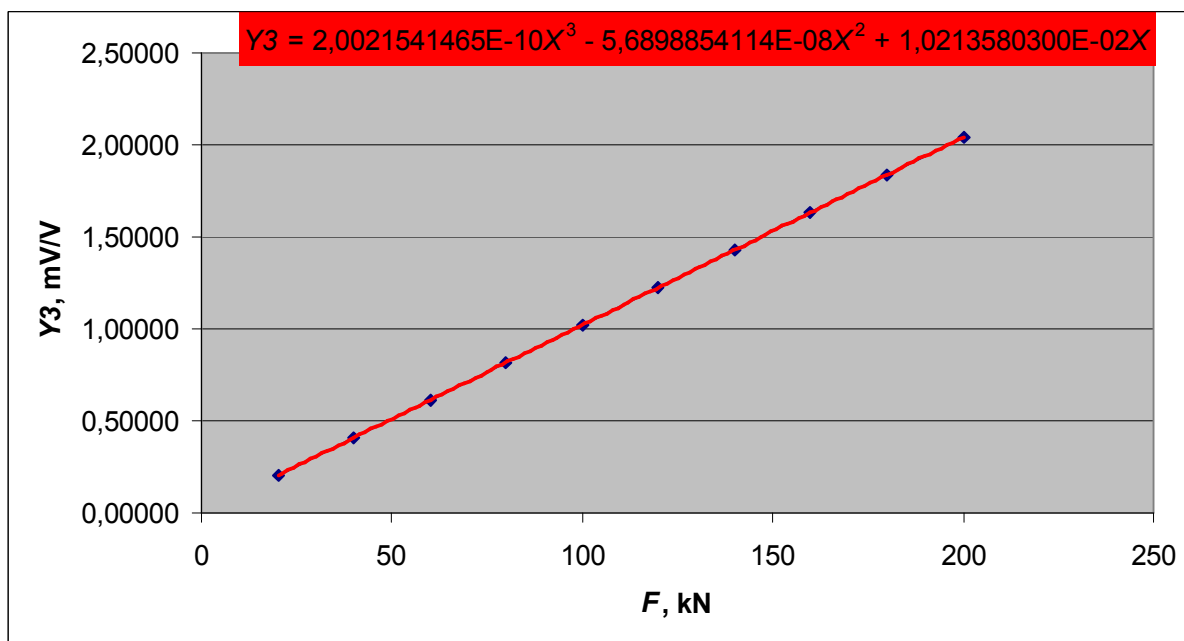


Slika 42: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 2. stupnja:

$$Y2 = A \cdot X^2 + B \cdot X,$$

$$A = -1,1762507639E-09$$

$$B = 1,0210093561E-02$$



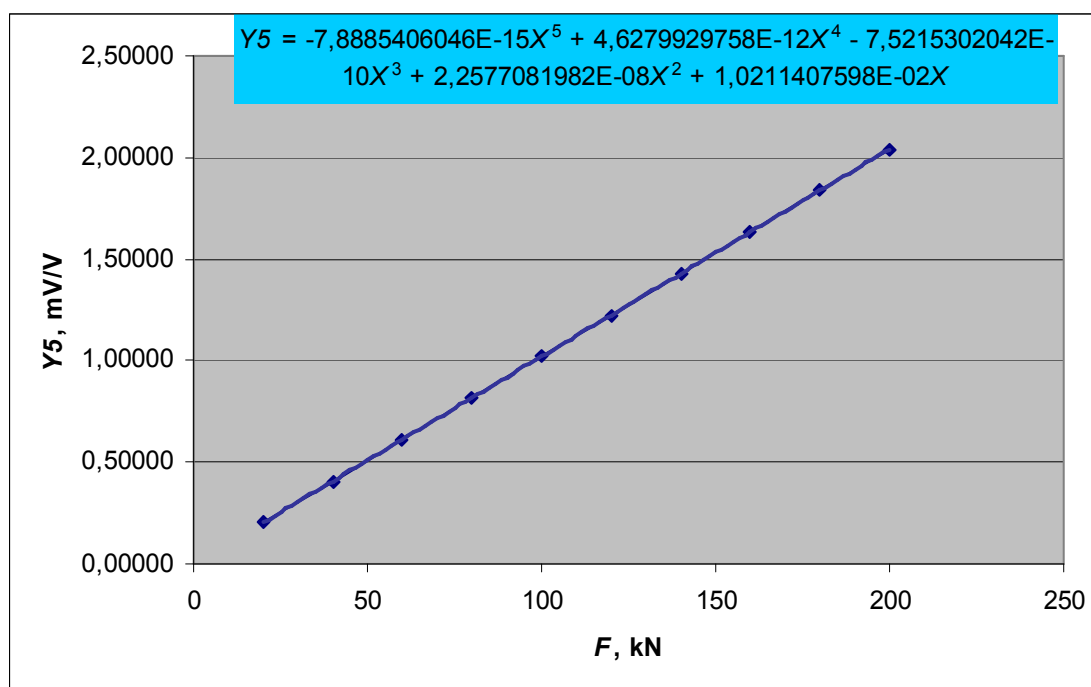
Slika 43: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 3. stupnja:

$$Y3 = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X,$$

$$A = 2,0021541465E-10$$

$$B = -5,6898854114E-08$$

$$C = 1,02135803E-02$$



Slika 44: Prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 5. stupnja:

$$Y5 = A \cdot X^5 + B \cdot X^4 + C \cdot X^3 + D \cdot X^2 + E \cdot X,$$

$$A = -7,8885406046E-15$$

$$B = 4,6279929758E-12$$

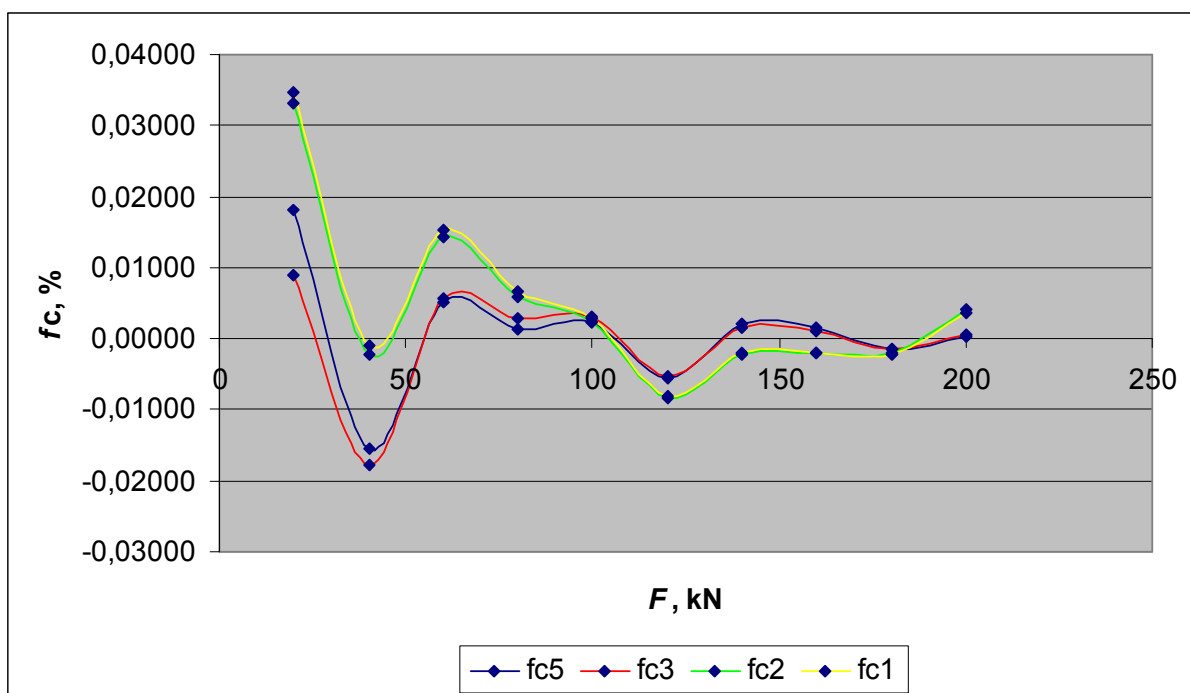
$$C = -7,5215302042E-10$$

$$D = 2,2577081982E-08$$

$$E = 1,0211407598E-02$$

Tablica 20: Interpolirane vrijednosti i relativna interpolacijska odstupanja za polinome različitog stupnja za prijenosni etalon Z4/200 kN

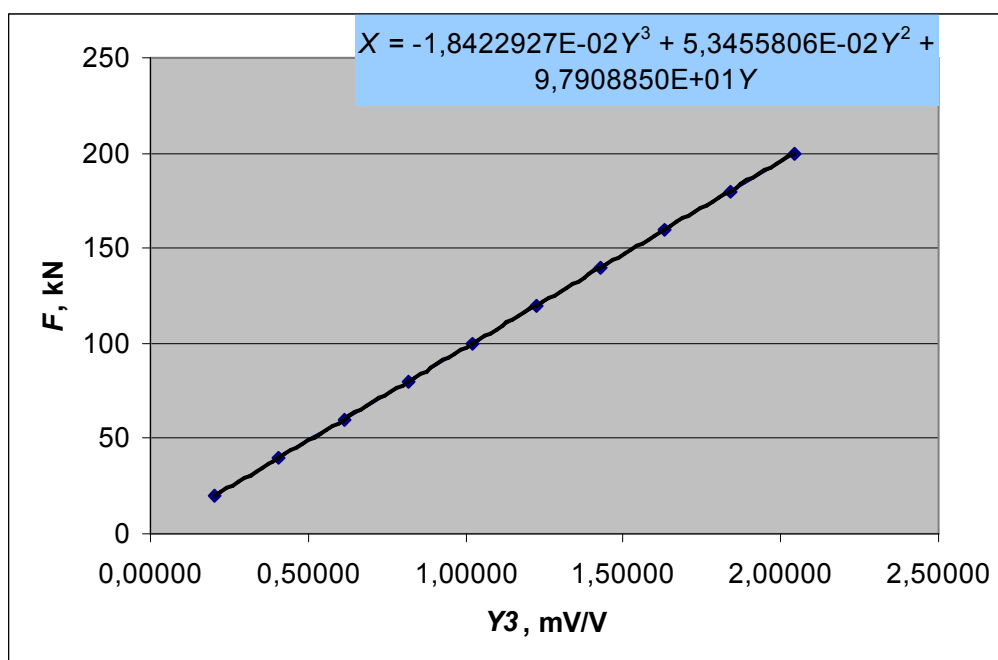
Sila, kN	X_{sr-r} , mV/V	$Y1$, mV/V	fc_1 , %	$Y2$, mV/V	fc_2 , %	$Y3$, mV/V	fc_3 , %	$Y5$, mV/V	fc_5 , %
20	0,20427	0,20420	0,03458	0,20420	0,03300	0,20425	0,00898	0,20423	0,01807
40	0,40839	0,40840	-0,00095	0,40840	-0,00230	0,40846	-0,01775	0,40846	-0,01539
60	0,61269	0,61259	0,01534	0,61260	0,01422	0,61265	0,00576	0,61266	0,00512
80	0,81685	0,81679	0,00667	0,81680	0,00578	0,81682	0,00274	0,81684	0,00141
100	1,02102	1,02099	0,00294	1,02100	0,00228	1,02099	0,00309	1,02100	0,00221
120	1,22509	1,22519	-0,00801	1,22519	-0,00844	1,22516	-0,00534	1,22516	-0,00545
140	1,42936	1,42939	-0,00206	1,42939	-0,00225	1,42934	0,00157	1,42933	0,00200
160	1,63355	1,63359	-0,00195	1,63358	-0,00192	1,63354	0,00105	1,63353	0,00155
180	1,83774	1,83778	-0,00232	1,83778	-0,00206	1,83777	-0,00151	1,83777	-0,00137
200	2,04205	2,04198	0,00353	2,04197	0,00403	2,04204	0,00059	2,04205	0,00030



Slika 45: Relativno interpolacijsko odstupanje u ovisnosti o sili za pravac i polinome 2., 3. i 5. stupnja za etalon Z4/200 kN

Tablica 21: Interpolirane vrijednosti za prijenosni etalon Z4/200 kN

Sila, kN	Interpolacija polinomom 3. stupnja, mV/V				
	0	2	4	6	8
20	0,20425	0,22467	0,24510	0,26552	0,28594
30	0,30636	0,32678	0,34720	0,36762	0,38804
40	0,40846	0,42888	0,44930	0,46972	0,49014
50	0,51056	0,53098	0,55140	0,57182	0,59224
60	0,61265	0,63307	0,65349	0,67391	0,69432
70	0,71474	0,73516	0,75557	0,77599	0,79641
80	0,81682	0,83724	0,85766	0,87807	0,89849
90	0,91891	0,93932	0,95974	0,98016	1,00057
100	1,02099	1,04141	1,06182	1,08224	1,10266
110	1,12307	1,14349	1,16391	1,18432	1,20474
120	1,22516	1,24557	1,26599	1,28641	1,30683
130	1,32724	1,34766	1,36808	1,38850	1,40892
140	1,42934	1,44975	1,47017	1,49059	1,51101
150	1,53143	1,55185	1,57227	1,59269	1,61311
160	1,63354	1,65396	1,67438	1,69480	1,71522
170	1,73565	1,75607	1,77650	1,79692	1,81734
180	1,83777	1,85819	1,87862	1,89905	1,91947
190	1,93990	1,96033	1,98075	2,00118	2,02161
200	2,04204	2,06247	2,08290	2,10333	2,12376



Slika 46: Inverzni prikaz rezultata umjeravanja etalona Z4/200 kN polinomom 3. stupnja:

$$X = R \cdot X^3 + S \cdot X^2 + T \cdot X,$$

$$R = -1,8422927E-02$$

$$S = 5,3455806E-02$$

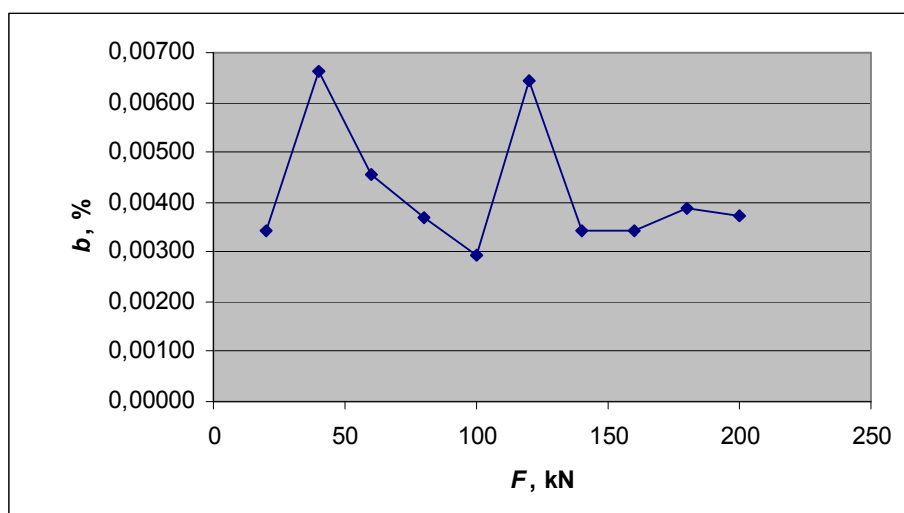
$$T = 9,790885E+01$$

Tablica 22: Relativno odstupanje nul vrijednosti za prijenosni etalon Z4/200 kN

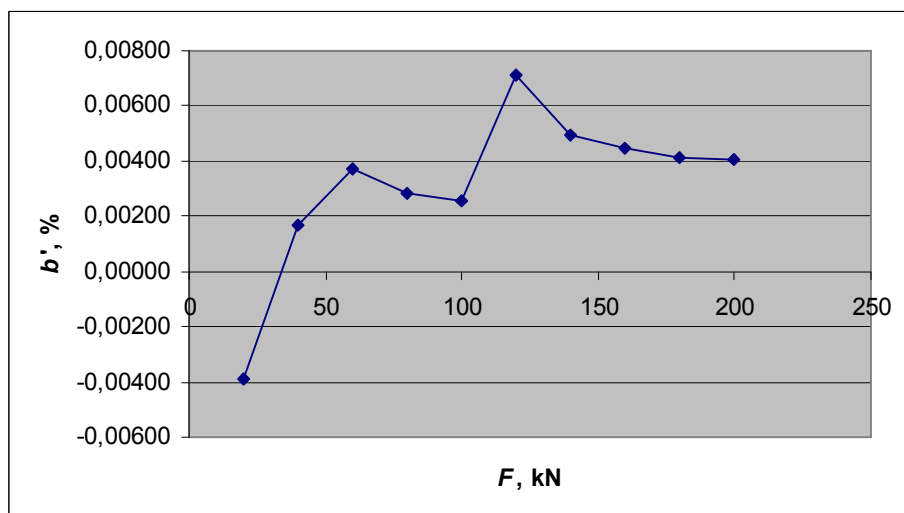
	Mjerni niz			
	X_1	X_2	X_4'	X_6'
Relativno odstupanje nul vrijednosti (f_0), %	0,00294	0,00196	0,00343	0,00343

Tablica 23: Kriteriji za klasifikaciju prijenosnog etalona Z4/200 kN

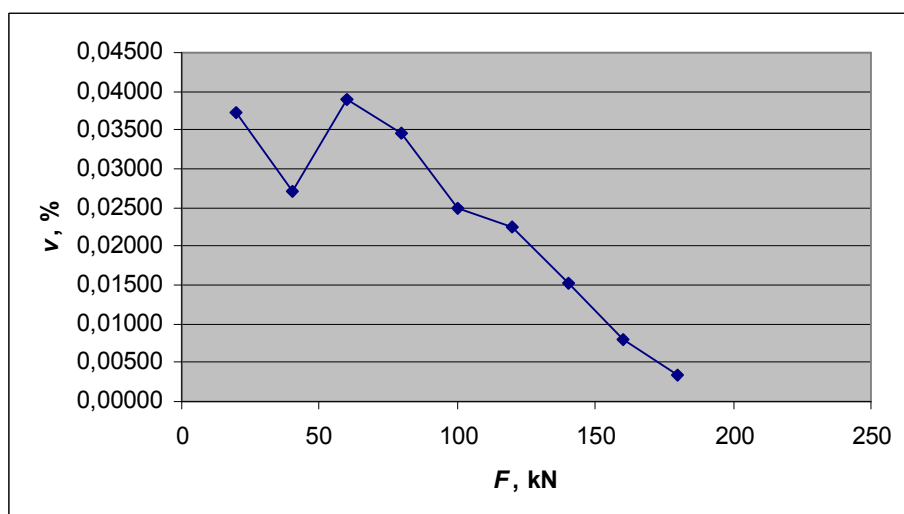
Sila, kN	X_{sr-wr} , mV/V	X_{sr-r} , mV/V	b' , %	b , %	v , %	f_c , %
20	0,20426	0,20427	-0,00393	0,00343	0,03714	0,00898
40	0,40839	0,40839	0,00171	0,00661	0,02715	-0,01775
60	0,61269	0,61269	0,00375	0,00457	0,03899	0,00576
80	0,81684	0,81685	0,00281	0,00367	0,03456	0,00274
100	1,02102	1,02102	0,00255	0,00294	0,02496	0,00309
120	1,22508	1,22509	0,00710	0,00645	0,02244	-0,00534
140	1,42936	1,42936	0,00497	0,00343	0,01525	0,00157
160	1,63356	1,63355	0,00447	0,00343	0,00799	0,00105
180	1,83775	1,83774	0,00414	0,00387	0,00332	-0,00151
200	2,04206	2,04205	0,00406	0,00372		0,00059



Slika 47: Relativna greška ponovljivosti s rotacijom u ovisnosti o sili za etalon Z4/200 kN



Slika 48: Relativna greška obnovljivosti bez rotacije u ovisnosti o sili za etalon Z4/200 kN



Slika 49: Relativna greška histereze u ovisnosti o sili za etalon Z4/200 kN